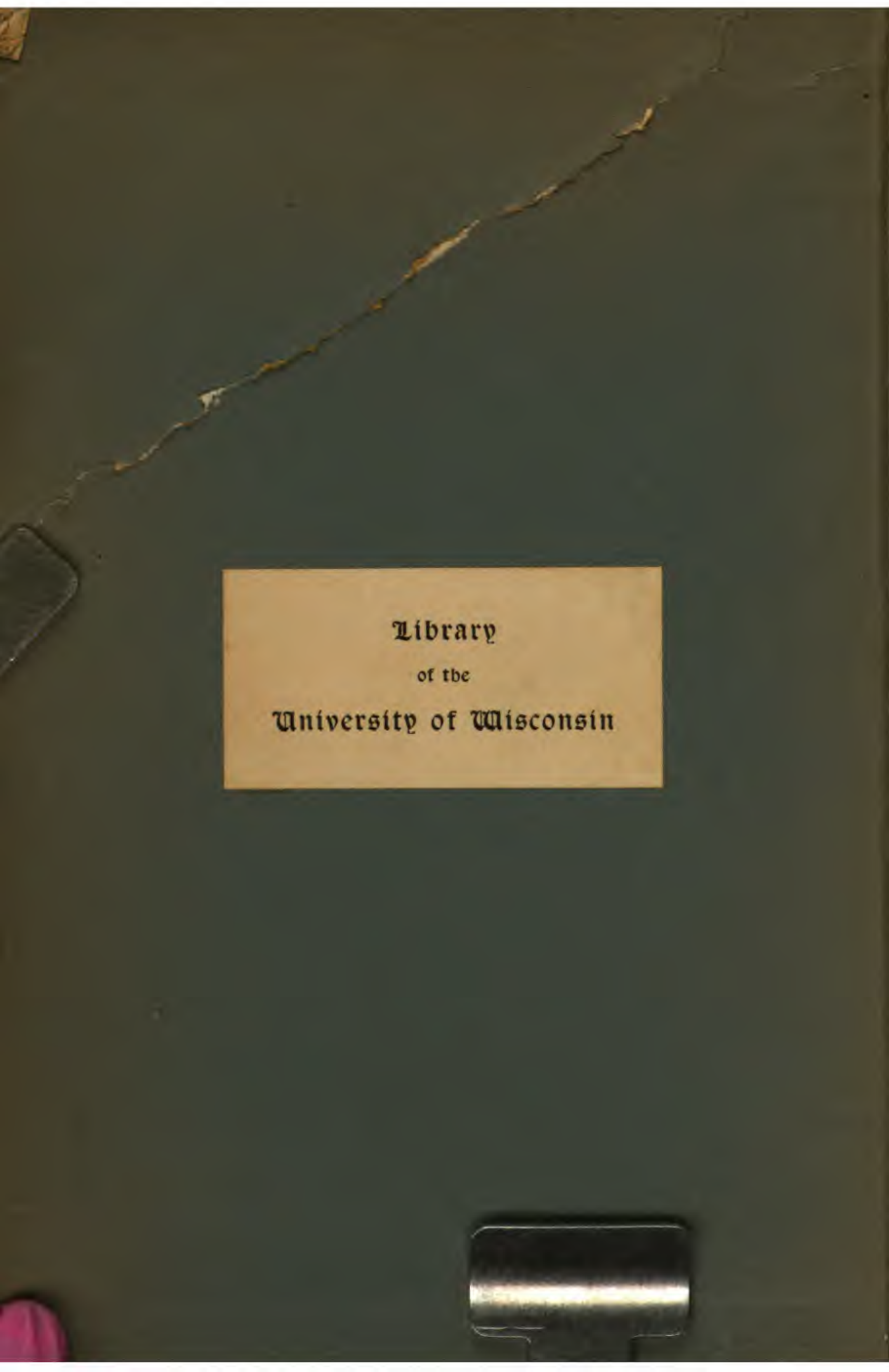
Eric Gerard

Mesures Electriques

2e ÉDITION

PARIS
GAUTHIER-VILLARS ÉDITEUR


Library
of the
University of Wisconsin

Mesures Électriques.

Liége. — Imprimerie DE THIER, boulevard de la Sauvenière, 10.

Mesures Électriques

Leçons

PROFESSÉES

A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE MONTEFIORE

ANNEXÉ A L'UNIVERSITÉ DE LIÉGE

PAR

Eric GERARD

DIRECTEUR DE CET INSTITUT

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LIÉGE

DEUXIÈME ÉDITION

REFONDUE ET COMPLÉTÉE

Avec 217 figures dans le texte

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, ÉDITEUR

Quai des Grands-Augustins, 55

1901

PRÉFACE

Dans les Leçons sur l'Électricité [1], *que j'ai publiées précédemment, je n'ai introduit que des notions générales sur les mesures. Le présent ouvrage contient les développements du cours sur les essais électriques que je professe devant les élèves électriciens de l'Institut électrotechnique Montefiore. Ce sujet mérite une étude approfondie, car les mesures précises sont la base des progrès réalisés dans la construction des appareils électriques. Ces progrès ont été rapides, parce que les électriciens, formés dans les laboratoires, ont appliqué dès le début les procédés rigoureux d'investigation qui caractérisent les recherches physiques. Ce ne sera pas un de leurs moindres mérites d'avoir contribué à introduire dans la Technique les essais fréquents et exacts.*

*J'expose dans l'*Introduction *les méthodes employées pour la discussion des expériences. Ces méthodes sont appliquées, dans le cours de l'ouvrage, à de nombreux exemples; elles fixent le degré d'approximation des résultats et elles détournent les commençants*

---

[1] *Leçons sur l'Électricité, Paris, Gauthier-Villars.*

du travers trop fréquent d'exprimer ceux-ci par des nombres de chiffres qui ne sont nullement en rapport avec la précision des mesures qui les ont fournis. Étant donnée l'approximation que l'on cherche à obtenir, la discussion des méthodes d'essai indique la rigueur à apporter dans chacune des observations qui concourent au résultat et elle permet d'utiliser aussi bien que possible le temps dont on dispose pour les expériences, ce qui est d'une importance capitale dans les laboratoires industriels.

*J'ai cru bon d'examiner dans l'*Introduction *les principales mesures géométriques, mécaniques et photométriques, appliquées couramment par les Électriciens, afin de leur rémémorer ces mesures dont les descriptions sont éparpillées dans des ouvrages spéciaux.*

Les mesures électriques débutent par la description des étalons et l'exposé des méthodes générales employées pour la détermination des intensités de courant, des quantités d'électricité, des forces électromotrices, des capacités, des puissances électriques et des coefficients d'induction. Pour les essais précis, j'insiste sur l'emploi du galvanomètre Deprez-d'Arsonval et de ses dérivés qui sont utilisés de plus en plus. J'ai cherché à éviter les calculs fastidieux auxquels se prêtent certains dispositifs d'expérience, tels que le pont de Wheatstone, pour me borner aux développements mathématiques d'une utilité réelle.

Comme on le verra par l'examen de la table analytique des matières, les méthodes d'essai ont été classées de manière à venir en aide à la mémoire.

Les essais magnétiques sont traités avec l'ampleur que leur importance comporte. Depuis les travaux de MM. Hopkinson et Ewing, la perméabilité et l'hystérésis du fer employé dans la construction des machines électriques sont éprouvées avec autant de

soin que la conductibilité du cuivre qui sert à la fabrication des bobines.

Après les procédés généraux de mesure viennent les applications aux essais des galvanomètres, des câbles, des lignes télégraphiques, des réseaux électriques, des piles, des accumulateurs, des machines électriques, des moteurs et des transformateurs. J'ai commencé par les applications dans lesquelles on n'utilise que des courants faibles et de basse tension, que les élèves peuvent aborder sans danger pour eux-mêmes et pour les appareils qu'ils emploient. Ces premiers exemples, qui constituent d'excellents exercices par lesquels les débutants s'habituent à traiter les problèmes avec la rigueur scientifique et à comparer les résultats fournis par les diverses méthodes, ont été multipliés à dessein. C'est après seulement que viennent les essais des générateurs, transformateurs et récepteurs de courants intenses, qui ont généralement un caractère plus industriel.

Dans cette seconde édition, j'ai eu l'occasion de mettre à profit les observations qui m'ont été suggérées et d'introduire les méthodes nouvelles les plus intéressantes qui ont paru dans ces dernières années.

On trouvera notamment des changements dans les chapitres relatifs aux étalons de mesure, au matériel de laboratoire, aux galvanomètres et ampèremètres, ainsi qu'aux méthodes potentiométriques.

Des additions nombreuses ont permis d'exposer les perfectionnements récents apportés aux wattmètres, phasemètres, fréquencemètres et autres appareils spéciaux aux courants alternatifs.

Le chapitre des compteurs s'est enrichi de la description de nouveaux appareils. De même, les chapitres consacrés à la perméabilité et à l'hystérésis, aux canalisations et aux accumulateurs ont reçu des ajoutes. Les lignes de tramways ont été traitées à part. Enfin,

les essais des machines à courant continu et à courants alternatifs, des transformateurs statiques, des transformateurs rotatifs et des commutatrices ont été développés et complétés.

De nouveaux tableaux ont é.é ajoutés à la fin du volume.

Je remercie M. De Bast, répétiteur à l'Institut électrotechnique Montefiore, qui m'a prêté son concours dans la correction des épreuves de cet ouvrage.

ERIC GERARD.

INTRODUCTION.

Chapitre I.

EXÉCUTION, DISCUSSION ET COMPTES-RENDUS DES ESSAIS. UNITÉS DE MESURE.

Classification des méthodes d'essai. — Pour trouver la *grandeur numérique* d'une quantité, c'est à dire le rapport de celle-ci à une quantité de même espèce, choisie comme unité, deux méthodes peuvent être employées.

La première consiste à comparer la grandeur étudiée à un *étalon* représentant l'unité choisie ou un multiple de cette unité ; tel est le cas de la détermination d'une longueur au moyen du mètre. Une mesure de ce genre est dite *directe* ou *relative*.

La seconde méthode permet d'évaluer les quantités au moyen d'étalons d'espèces différentes, en se servant des relations qui unissent les grandeurs entr'elles. Par exemple, pour mesurer une surface, on ne la compare pas directement à un étalon de surface, mais on détermine ses dimensions linéaires à l'aide de l'unité de longueur, et l'on applique la relation existant entre la surface et ses dimensions. Cette mesure est appelée *indirecte* ou *absolue*.

Les mesures directes comportent elles-mêmes deux subdivi-

sions : les *méthodes de comparaisons successives* ou *de déviation* et les *méthodes de réduction à zéro* ou plus simplement *de zéro*. Dans les premières, on ramène la comparaison entre la grandeur inconnue et son étalon à la comparaison de deux grandeurs d'une autre espèce. Ainsi, dans la balance romaine, le rapport de deux poids est réduit au rapport de deux longueurs. Dans les secondes, on identifie les effets de la grandeur cherchée avec ceux de l'étalon. Dans la balance ordinaire, on équilibre le poids inconnu à l'aide de poids connus.

Les méthodes de déviation permettent de suivre la marche d'un phénomène; c'est ainsi qu'un galvanomètre gradué indique les variations du courant qui le traverse. Les méthodes de zéro sont généralement plus précises parce qu'elles utilisent l'appareil de mesure dans les meilleures conditions de sensibilité.

Mesures directes. Erreurs systématiques et erreurs fortuites. — Les résultats d'essais présentent inévitablement des erreurs qui proviennent soit de la méthode employée, soit des instruments utilisés, soit de l'observateur même. Ces erreurs se divisent en deux classes.

La première comprend les erreurs, dites *constantes* ou *systématiques*, qui affectent le résultat dans un sens déterminé, toujours le même. Elles peuvent provenir d'un vice de méthode, d'une défectuosité d'appareil ou d'un défaut physique de l'observateur. Le déplacement du zéro d'un galvanomètre, la lenteur d'un observateur qui doit faire partir un chronomètre au moment où il voit ou entend un phénomène, amènent des erreurs systématiques.

On ne peut corriger ces erreurs qu'en variant les méthodes d'observation, les instruments et les observateurs; la comparaison des divers résultats avec le résultat moyen permet d'estimer les erreurs systématiques. On peut souvent modifier les conditions d'expérience de manière qu'une erreur positive devienne négative, ce qui procure une moyenne exacte. Par exemple, le déplacement du zéro d'un galvanomètre augmente ou diminue la lecture faite sur la graduation suivant que le courant traverse l'instrument dans l'un ou l'autre sens.

Les changements, tels que ceux qui sont dus à l'influence de la température sur la longueur ou sur la résistance électrique des corps,

des variations du magnétisme terrestre sur les aimants, de la polarisation sur la force électromotrice d'une pile, doivent être regardés comme des erreurs systématiques, qu'on peut corriger lorsqu'on connait l'importance et le mode d'action de ces causes.

Une seconde catégorie d'erreurs, dites *variables* ou *fortuites*, sont caractérisées par la propriété de fournir indifféremment des valeurs plus grandes ou des valeurs plus petites que le résultat vrai. Ainsi, lorsqu'un observateur mesure plusieurs fois une longueur de quelques mètres en employant un mètre étalon, il trouve généralement des nombres différents, qui peuvent s'écarter aussi bien en plus qu'en moins de la valeur exacte.

Lorsque toutes les observations ont comporté le même soin, la valeur la plus probable est fournie par la moyenne arithmétique des résultats. Cette moyenne élimine, autant que possible, les erreurs variables, mais elle reste affectée des erreurs constantes qui, dans l'exemple précédent, peuvent tenir à une courbure du mètre étalon, à un défaut de graduation de celui-ci, etc., et pour lesquelles des corrections séparées doivent être faites.

Il est important d'insister sur la nécessité d'apporter la même rigueur dans toutes les observations entrant dans la moyenne. Les débutants ont une tendance à se guider sur les premiers résultats obtenus et à rejeter ceux qui s'en écartent, de crainte d'arriver à des tableaux discordants. D'autres fois, les opérateurs ont une idée préconçue du résultat et éliminent les observations qui s'en éloignent. Si même il connaît le résultat auquel il doit arriver, l'observateur doit agir comme s'il l'ignorait et n'écarter que les résultats qui s'éloignent de la moyenne par suite d'une faute évidente. Les derniers résultats doivent être notés avec autant de soin que les premiers ; ils ont plutôt plus de valeur puisque, dans le cours des expériences, l'observateur a pu se perfectionner.

Il est bon de s'habituer à estimer le dixième de la dernière division de l'instrument dont on se sert. Si même le fil de réticule ou l'index qui sert aux lectures est un peu grossier, il vaut mieux écrire la fraction estimée en dixièmes que sous la forme $^1/_2$, $^1/_4$, quitte à mentionner que l'erreur possible de lecture est 0,5 ou 0,25 d'une division. Avec un fil de réticule suffisamment fin, on arrive très bien à estimer le dixième d'une division correspondant à 0,5 mm. L'erreur maxima comporte alors 0,05 mm

La moyenne des résultats a d'autant plus de chances de se rapprocher du résultat vrai inconnu que les nombres trouvés diffèrent moins entre eux. On peut avoir un terme de comparaison à cet égard en considérant l'*erreur moyenne*, définie par la moyenne des différences entre le résultat moyen et les observations isolées, abstraction faite du signe de ces différences.

Ainsi, supposons que des mesures d'une longueur aient conduit aux nombres suivants :

MÈTRES	DIFFÉRENCES
167,95	+ 19
167,45	— 31
167,60	— 16
167,60	— 16
167,87	+ 11
167,88	+ 12
168,00	+ 24
167,85	+ 9
167,82	+ 6
167,60	— 16
Résultat moyen : 167,76	Différence moyenne : 16

Le résultat est 167,76 ± 0,16 mètres. Ce résultat doit éventuellement être corrigé des erreurs constantes connues. Si les erreurs constantes ont varié pendant les observations, chaque résultat partiel doit être corrigé isolément, avant le calcul des moyennes.

Le nombre des observations à adopter dépend des différences que celles-ci présentent entre elles. Si les différencessont faibles, on conçoit qu'il est inutile de multiplier les mesures. Dans tous les cas, le calcul des probabilités enseigne que le crédit qu'on doit accorder au résultat moyen croît, non pas comme le nombre d'observations, mais comme la racine carrée de ce nombre, qui dépasse rarement 10.

L'*erreur relative moyenne* est le rapport de l'erreur moyenne au résultat moyen. Dans l'exemple précédent, cette erreur est $\frac{0,16}{167,76}$, soit environ 0,001, c'est à dire 0,1 pour 100. Comme on le verra, c'est l'erreur relative moyenne qui sert généralement de base dans la discussion des méthodes d'essai.

Les erreurs fortuites suivent une loi qui a été découverte par Laplace et qui permet de calculer l'*erreur fortuite probable* du résultat moyen, celui-ci restant éventuellement entaché des erreurs systématiques inconnues. Dans les mesures électrotechniques, celles-ci sont souvent supérieures aux erreurs fortuites et peuvent difficilement être éliminées. Aussi est-il rarement utile, dans ces mesures, de faire les calculs compliqués qu'exige la détermination de l'erreur fortuite probable. L'indication de l'erreur moyenne suffit pour édifier sur la valeur des observations. Lorsque la précision des mesures comporte la détermination de l'erreur fortuite probable, on calcule celle-ci suivant les règles indiquées dans les traités spéciaux sur le calcul des probabilités.

Il y a un genre d'erreurs que nous avons laissées de côté. Ce sont les fautes grossières d'observation ou de calcul, les copies inexactes des résultats, etc. Souvent ces erreurs sont évidentes à la simple inspection des résultats ; on arrive à les éviter par le soin et l'ordre dans le travail.

Mesures indirectes. Erreur limite et erreur probable. — Lorsqu'un résultat est obtenu indirectement à l'aide de données expérimentales, il est important, aux points de vue de la discussion de la méthode et de la détermination des conditions d'essai les plus favorables, de fixer l'influence que présentent les erreurs moyennes commises dans les diverses observations sur l'exactitude du résultat final.

Lorsque, par exemple, l'intensité d'un courant est mesurée à l'aide de la déviation d'un galvanomètre, il est utile de vérifier quelle importance une erreur de lecture peut avoir sur la détermination de l'intensité. On arrive ainsi à définir dans quelle région de l'échelle l'influence de l'erreur de lecture est la plus faible. On peut déterminer par expérience entre quelles limites il est possible de faire varier l'intensité du courant sans apporter de modification sensible à la déviation du galvanomètre; mais il faudrait de longs tâtonnements pour déterminer dans quelle région de l'échelle l'erreur relative, due au défaut de sensibilité de l'appareil, est la plus petite. Le calcul permet de résoudre directement ce problème.

Il est non moins important d'estimer l'influence des erreurs partielles afin de déterminer les observations qu'il est utile de faire avec le plus de soin et celles dans lesquelles une erreur a peu d'importance. On arrive ainsi à utiliser de la meilleure manière possible le temps dont on dispose.

Le résultat des mesures indirectes est entaché des erreurs systématiques des observations qu'elles comportent. De plus, une erreur systématique peut encore provenir de ce que le résultat n'est pas lié aux données expérimentales par la fonction qu'on a admise. Ces erreurs constantes s'éliminent en variant les méthodes d'essai, les instruments et les modes d'observation, et en corrigeant les défauts connus.

Reste l'erreur du résultat due aux erreurs fortuites moyennes des diverses observations ; voici comment on l'estime.

Supposons que le résultat cherché y soit une fonction de diverses données d'observation x_1, x_2,... x_n, sur lesquelles des erreurs δ_1, δ_2,... δ_n, peuvent être commises. Si ces erreurs sont assez faibles pour qu'il soit permis de négliger leurs carrés, on peut les supposer infinitésimales et les désigner par dx_1, dx_2,... dx_n ; on détermine alors l'erreur du résultat en appliquant les règles du calcul différentiel, ce qui permet de simplifier les opérations. Il faut toutefois se rappeler que, dans les applications usuelles, ce procédé n'est pas d'une rigueur mathématique absolue et ne donne que des résultats approchés.

Les erreurs partielles dx_1, dx_2 ,... dx_n, s'estiment en ayant égard à la précision des instruments qui ont servi à effectuer les diverses observations. Si chaque observation a été répétée un certain nombre de fois d'une manière indépendante, on prend pour dx_1, dx_2,... dx_n, les erreurs fortuites moyennes, calculées comme on l'on vu précédemment.

De la fonction

$$y = f(x_1, x_2, \ldots x_n), \qquad (1)$$

on tire, en appelant dy l'erreur totale du résultat,

$$\pm\, dy = \pm \frac{df}{dx_1}\, dx_1 \pm \frac{df}{dx_2}\, dx_2 \pm \ldots \pm \frac{df}{dx_n}\, dx_n. \qquad (2)$$

Les erreurs partielles du résultat, dues aux erreurs des observations isolées, sont exprimées en grandeur par

$$e_1 = \frac{df}{dx_1} dx_1, \; e_2 = \frac{df}{dx_2} dx_2, \ldots e_n = \frac{df}{dx_n} dx_n.$$

Le signe des termes du second membre de (2) est indéterminé; pour connaître l'*erreur absolue limite* du résultat, on suppose que toutes les erreurs s'ajoutent, d'où

$$E_l = e_1 + e_2 + \ldots + e_n = \frac{df}{dx_1} dx_1 + \frac{df}{dx_2} dx_2 + \ldots + \frac{df}{dx_n} dx_n.$$

Dans le cas particulier où les expériences sont conduites de manière à rendre les erreurs partielles égales, on a

$$e_1 = e_2 = \ldots = e_n = \frac{E_l}{n}.$$

L'*erreur relative limite* commise sur y est une fonction de la forme

$$\frac{E_l}{y} = \varphi(x_1, x_2, \ldots x_n). \qquad (3)$$

Lorsque la fonction y ne renferme qu'un seul terme, on trouve directement l'erreur relative limite en prenant le logarithme de la fonction et en différentiant. Tel est le cas suivant.

L'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence est proportionnelle au cube du produit de la tension par le courant :

$$I = k\,(ei)^3.$$

De là on tire

$$\text{Log}_{\text{nép.}}\, I = \text{Log}_{\text{nép.}}\, k + 3\,\text{Log}_{\text{nép.}}\, e + 3\,\text{Log}_{\text{nép.}}\, i.$$

En différentiant, on arrive directement à

$$\frac{dI}{I} = \frac{3\,de}{e} + \frac{3\,di}{i}.$$

Dans cet exemple, si l'on s'impose l'égalité des erreurs relatives partielles, $\frac{3\,de}{e} = \frac{3\,di}{i}$, on obtient pour l'erreur résultante

$$\frac{dI}{I} = 6\,\frac{de}{e} = 6\,\frac{di}{i}.$$

c'est à dire que l'erreur relative limite du résultat est sextuple de celle qu'entraîne la lecture de l'intensité du courant.

Au lieu de supposer que toutes les erreurs partielles s'ajoutent, ce qui est le cas le plus défavorable, on peut admettre que ces erreurs peuvent être aussi bien positives que négatives. Le calcul des probabilités montre qu'alors la valeur la plus probable de l'erreur, appelée *l'erreur absolue probable*, est

$$E_p = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \ldots + e_n^2}.$$

L'erreur relative probable est

$$\frac{E_p}{y} = \varphi'(x_1, x_2, \ldots x_n). \qquad (4)$$

Si l'on s'impose l'égalité des erreurs partielles, on arrive dans ces conditions à

$$e_1 = e_2 = \ldots = e_n = \frac{E_p}{\sqrt{n}}.$$

Dans l'exemple précédent, on a pour l'erreur relative probable

$$3\sqrt{\left(\frac{de}{e}\right)^2 + \left(\frac{di}{i}\right)^2};$$

si les erreurs relatives partielles sont égales, on voit que l'erreur relative probable du résultat est égale à $3\sqrt{2}$ fois celle que comporte la mesure du courant.

Conditions les plus favorables d'une mesure indirecte. — Il arrive fréquemment qu'on peut modifier les conditions d'une mesure de manière à rendre minima l'erreur relative du résultat.

Cas d'une seule variable. — Soit, par exemple, le cas de l'emploi d'un galvanomètre des tangentes shunté, qui donne l'intensité d'un courant par l'application de la formule

$$i = K \operatorname{tang} \alpha;$$

K étant un facteur qu'on peut faire varier à volonté, en modifiant le shunt employé.

On peut se poser le problème de déterminer la valeur de α qui

rend minima l'erreur relative que comporte i. L'erreur absolue di, due à une erreur $d\alpha$ commise dans la lecture de l'angle, est

$$di = K \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha}.$$

L'erreur $d\alpha$ correspond à 0,5, 0,25, ... 0,1 de division de l'échelle suivant la finesse de l'aiguille indicatrice, l'écartement des traits limites et l'habileté de l'observateur.

L'erreur relative limite est

$$\frac{di}{i} = \frac{2\, d\alpha}{\sin 2\alpha} = \varphi(\alpha).$$

La condition du minimum de l'erreur s'obtient en posant

$$\frac{d\varphi(\alpha)}{d\alpha} = o.$$

Elle conduit à $\cos 2\alpha = o$ ou $\alpha = 45°$. On vérifie facilement que la dérivée seconde est positive pour $\alpha = 45°$ et que, par conséquent, on a bien affaire à un minimum. Dans beaucoup de cas, la seule inspection du résultat montre si l'on se trouve en présence d'un maximum ou d'un minimum.

Il est important de rechercher le minimum de l'erreur relative et non celui de l'erreur absolue du résultat. Dans l'exemple précédent, l'erreur absolue est minima pour $\alpha = o$; c'est la valeur pour laquelle le galvanomètre présente le maximum de sensibilité, mais alors l'erreur relative devient énorme.

Il n'est pas toujours possible de trouver des conditions d'expérience correspondant à un minimum de l'erreur. Dans le cas du galvanomètre des tangentes sans shunt, on ne peut pas modifier K de manière à obtenir, pour une valeur quelconque de i, une déviation α voisine de 45°.

Il arrive assez fréquemment que les méthodes ou les appareils dont on dispose ne permettent pas de se placer dans les meilleures conditions d'essai. Lorsqu'on mesure le courant débité par une dynamo, à l'aide d'un ampèremètre à divisions égales, le minimum d'erreur relative limite correspond à la déviation maxima ; mais si le courant fourni par la machine ne dévie pas l'aiguille au delà des premières divisions de l'échelle et si l'on n'a pas d'autre appa-

reil à sa disposition, il faut bien accepter l'erreur considérable qui en résulte. Dans ce cas, on a

$$i = K\alpha$$

d'où

$$\frac{di}{i} = \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Pour une erreur absolue $d\alpha$ déterminée, l'erreur relative $\frac{di}{i}$ diminue quand α croît ; mais α est lié aux valeurs invariables i et K.

Il en est ainsi pour toute expression telle que

$$i = f(\alpha)$$

dans laquelle les paramètres de α sont invariables et i est déterminé, car une seule valeur est alors possible pour α.

Cas de plusieurs variables. — Dans le cas de plusieurs variables, nous avons trouvé pour l'erreur relative limite,

$$\frac{E_l}{y} = \varphi\,(x_1, x_2, \ldots x_n),$$

et pour l'erreur relative probable

$$\frac{E_p}{y} = \varphi'\,(x_1, x_2, \ldots x_n).$$

Le minimum de l'erreur relative limite est donné par

$$\frac{d\varphi}{dx_1} = 0, \frac{d\varphi}{dx_2} = 0, \ldots \frac{d\varphi}{dx_n} = 0,$$

et le minimum de l'erreur relative probable par

$$\frac{d\varphi'}{dx_1} = 0, \frac{d\varphi'}{dx_2} = 0, \ldots \frac{d\varphi'}{dx_n} = 0.$$

On distingue le minimum d'un maximum par la condition que les dérivées du second ordre soient positives, à moins que l'inspection des résultats ne rende cette distinction évidente. Souvent on trouve la condition de minimum en appliquant des règles simples : dans certains cas, la quantité à rendre minima est une somme de deux termes dont le produit est constant ; la plus petite valeur de la somme correspond à l'égalité des termes.

Ainsi qu'on l'a fait remarquer à propos des fonctions à une seule variable, il n'est pas toujours possible de réaliser la condition du minimum d'erreur, mais on doit chercher à s'en rapprocher.

En général, l'importance des erreurs varie peu au voisinage du minimum, de sorte qu'il n'y a aucun inconvénient, dans la plupart des cas, à s'écarter, dans une certaine mesure, des conditions théoriques les plus favorables.

C'est la raison pour laquelle on détermine fréquemment les meilleures conditions d'expérience en cherchant à rendre minima non l'erreur relative probable, dont l'expression affecte souvent la forme d'une fonction compliquée, se prêtant difficilement au calcul, mais bien l'erreur relative limite qui est ordinairement beaucoup plus simple.

Considérons le cas fréquent de deux variables,

$$y = f(x_1, x_2).$$

Deux solutions se présentent :

1). On peut chercher le rapport $\frac{x_1}{x_2}$ qui rend minima l'erreur relative du résultat. La connaissance de ce rapport est suffisante lorsque les conditions d'expérience fixent la meilleure valeur à donner à l'une des variables. Le problème se réduit alors à la recherche de la valeur minima d'une fonction à une seule variable.

2). Si l'on veut déterminer les valeurs de x_1 et de x_2 considérés comme variables indépendantes, on dérive la fonction successivement par rapport à x_1 et à x_2 et l'on égale les dérivées à o.

Une application fera mieux comprendre ce qui précède. Dans plusieurs mesures que nous étudierons dans le cours de cet ouvrage, la grandeur numérique c d'une quantité est obtenue en fonction de celle de son étalon c' par deux déviations galvanométriques α et α', telles que

$$c = c' \frac{\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

On peut se demander quel est le meilleur rapport de α à α', qui rende minima : *a*) soit l'erreur relative limite commise sur c, *b*) soit l'erreur relative probable faite sur la même quantité.

a). Considérons d'abord l'erreur relative limite. On a pour les erreurs partielles

$$\frac{dc}{d\alpha}\,d\alpha = -\frac{c'\,\alpha'}{(\alpha-\alpha')^2}\,d\alpha,$$
$$\frac{dc}{d\alpha'}\,d\alpha' = \frac{c'\,\alpha}{(\alpha-\alpha')^2}\,d\alpha';$$

d'où, en admettant que les erreurs de lecture $d\alpha$ et $d\alpha'$ sont égales et donnent des erreurs partielles qui s'ajoutent,

$$E_l = \frac{c'\,(\alpha+\alpha')\,d\alpha}{(\alpha-\alpha')^2}$$

et

$$\frac{E_l}{c} = \frac{\alpha+\alpha'}{\alpha'\,(\alpha-\alpha')}\,d\alpha.$$

Posons

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = n,$$

il vient

$$\frac{E_l}{c} = \frac{n\,(n+1)}{(n-1)}\,\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

En considérant n comme seule variable, le minimum de l'erreur relative limite correspond à

$$n = 2{,}415.$$

b). Le carré de l'erreur probable du résultat est, pour $d\alpha = d\alpha'$,

$$E_p^2 = \frac{c'^2\,(\alpha^2+\alpha'^2)}{(\alpha-\alpha')^4}\,d\alpha^2;$$

et le carré de l'erreur relative probable

$$\frac{E_p^2}{c^2} = \frac{(\alpha^2+\alpha'^2)\,d\alpha^2}{\alpha^2\,(\alpha-\alpha')^2} = \frac{(n^2+1)\,n^2}{(n-1)^2}\,\frac{d\alpha^2}{\alpha^2}.$$

Le minimum de l'erreur relative probable correspond à

$$n^3 - 2\,n^2 - 1 = 0.$$

On trouve approximativement $n = 2,2$, résultat très peu différent de celui auquel conduit la considération de l'erreur limite.

Rapport à établir entre les erreurs partielles d'un résultat indirect. — Il est à remarquer que si un résultat comporte plusieurs mesures et si quelques unes de celles-ci admettent une approximation plus grande que d'autres, il est superflu de chercher à obtenir, pour les résultats partiels, une exactitude très supérieure à celle que permet d'atteindre l'observation la moins exacte. Cependant, pour que les erreurs partielles aient toutes la même influence, il peut arriver qu'il soit nécessaire de faire quelques observations avec plus d'exactitude que d'autres. On a vu que, dans l'évaluation du rendement lumineux d'une lampe à incandescence, la mesure du voltage doit se faire avec une précision sextuple de celle que comporte l'intensité lumineuse.

Voici un autre exemple. La résistibilité d'un conducteur de longueur l, de diamètre δ et de résistance r, est donnée par la formule

$$\rho = \frac{\pi\delta^2}{4} r \frac{1}{l}.$$

On trouve l'erreur relative limite en prenant la différentielle du logarithme de cette fonction et en supposant que les erreurs partielles s'ajoutent

$$\frac{d\rho}{\rho} = 2\frac{d\delta}{\delta} + \frac{dr}{r} + \frac{dl}{l}.$$

On voit que, si l'erreur partielle commise dans l'estimation du diamètre doit être égale à celle due à la mesure de la longueur, la première évaluation doit être faite avec une approximation double de celle que comporte la seconde. On doit donc apporter beaucoup plus d'exactitude dans la mesure du diamètre, qui est précisément la plus difficile. Si l'on ne peut mesurer le diamètre à moins de 1 pour 100 près, à l'aide de la jauge dont on dispose, il est inutile d'obtenir une exactitude supérieure dans l'estimation de la longueur, puisque le complément de temps et de soin que demande cette approximation plus grande n'augmente la précision du résultat final que d'une quantité insignifiante.

Si, dans l'exemple précédent, on considère l'erreur relative probable, on obtient

$$\frac{E_p^2}{\rho^2} = 4\frac{d\delta^2}{\delta^2} + \frac{dr^2}{r^2} + \frac{dl^2}{l^2}. \qquad (1)$$

Si l'on exige que les erreurs relatives partielles soient égales, il vient

$$\frac{2\,d\delta}{\delta} = \frac{dr}{r} = \frac{dl}{l} = \frac{E_p}{\rho\sqrt{3}}.$$

En se donnant l'erreur relative probable admissible dans le résultat, l'équation (1) permet de déterminer les erreurs partielles relatives des diverses observations. Si, dans l'hypothèse de l'égalité de celles-ci, l'erreur relative probable sur la résistibilité doit être 0,1 pour 100 au plus, on a

$$\frac{E_p}{\rho} = 0{,}001\,;$$

d'où

$$\frac{2d\delta}{\delta} = \frac{dr}{r} = \frac{dl}{l} = \frac{0{,}001}{\sqrt{3}} = 0{,}00058,$$

soit 0,058 pour 100. Partant, la mesure du diamètre doit être faite avec une approximation de 0,029 pour 100.

Il peut être avantageux de s'imposer une autre condition que celle de l'égalité des erreurs partielles ; c'est le cas lorsqu'il est possible d'accroître l'exactitude de certaines observations avec une faible dépense de temps. Il vaut mieux alors, étant donnée l'erreur permise sur le résultat, diminuer l'erreur partielle due à ces observations, de manière à pouvoir tolérer des erreurs partielles plus grandes dans les autres.

Il va sans dire que si l'on désire le résultat le plus exact possible, il faut tâcher de diminuer toutes les erreurs partielles, sans cependant perdre son temps à rechercher des approximations mal équilibrées. Ainsi, dans la détermination de l'effet utile d'une machine à vapeur, il est inutile de mesurer la longueur de la course du piston à 0,01 pour 100 près, si une erreur de 1 pour 100 peut être faite dans l'évaluation de la vitesse.

Si l'on admet l'égalité des erreurs partielles, on peut déduire quelques conséquences intéressantes :

1° L'erreur relative limite d'une *somme* est égale à celle de chacune des parties.

Soit

$$a = b + c;$$

on a

$$\frac{da}{a} = \frac{db + dc}{b + c}.$$

Donc

$$\frac{db}{b} = \frac{dc}{c} = \frac{db + dc}{b + c} = \frac{da}{a}.$$

2° L'erreur relative limite d'une *différence* est supérieure à celle de chacun des termes de celle-ci, d'autant plus que ces termes sont plus voisins de l'égalité.

De

$$a = b - c,$$

on déduit l'erreur limite

$$\frac{da}{a} = \frac{db + dc}{b - c}.$$

Or

$$\frac{db}{b} = \frac{dc}{c} = \frac{db - dc}{b - c};$$

d'où

$$\frac{da}{a} = \frac{db - dc + 2\,dc}{b - c} = \frac{db}{b} + \frac{2\,dc}{b - c}.$$

3° L'erreur relative limite d'un *produit* ou d'un *quotient* de 2 quantités est égale au double de l'erreur commise sur chacune de celles-ci.

$$a = bc \quad \text{et} \quad a = \frac{b}{c}$$

donnent l'erreur relative limite

$$\frac{da}{a} = \frac{db}{b} + \frac{dc}{c}.$$

4° L'erreur relative de la *puissance* n^e d'une quantité est égale à n fois l'erreur commise sur celle-ci.

5° L'erreur relative de la *racine* n^e d'une quantité est égale à la n^e partie de l'erreur que comporte cette dernière.

Ces résultats montrent que, dans le choix des méthodes de mesure, on doit chercher à éviter celles qui donnent la valeur désirée sous forme d'une puissance élevée, d'un produit d'un grand nombre de facteurs ou d'une différence minime.

En s'habituant à discuter les méthodes d'essai, on finit par acquérir le sens pratique, qui permet de distinguer rapidement les erreurs partielles négligeables et les corrections, relatives à l'effet de la température, de la pression, etc., qu'on peut laisser de côté. On évite ainsi l'obstacle sur lequel se buttent les personnes qui accordent une importance exagérée à certaines corrections se prêtant à des développements de calcul pour lesquels elles se sentent des aptitudes spéciales, et qui laissent de côté des circonstances physiques ou s'appuient sur des hypothèses susceptibles d'apporter des erreurs très supérieures aux précédentes.

Opérations numériques effectuées sur des valeurs approximatives. Règles à calcul. — Connaissant l'erreur moyenne relative d'un résultat direct ou l'erreur probable relative d'un résultat indirect, on peut apprécier le nombre de chiffres significatifs admissibles dans l'expression de ce résultat. Par chiffres significatifs, il faut entendre ceux qui n'ont pas simplement pour objet de déterminer la position de la virgule indicatrice des unités. Il faut que le dernier chiffre significatif soit seul incertain, l'avant-dernier étant exact. Ainsi, pour une erreur relative de 0,1 pour 100, le résultat ne doit pas comporter plus de 4 chiffres significatifs, bien que certaines opérations numériques effectuées pour calculer ce résultat puissent en fournir beaucoup plus. Si, par exemple, une division avait donné pour quotient 19369973, il faudrait écrire, en forçant le dernier chiffre, 19370000 ou plus simplement 1937×10^4.

Voici quelques-unes des approximations qu'on peut atteindre dans les mesures électriques. Les valeurs absolues de l'ohm, du volt et du coulomb sont connues à 0,1 pour 100 près. Les étalons à mercure de l'ohm peuvent être reproduits à 0,001 pour

100 près; les étalons métalliques de la même grandeur sont réalisés à 0,01 pour 100 près; les résistances des boîtes usuelles sont des copies exactes à 0,5 pour 100 près. Les condensateurs isolés au mica sont étalonnés à 0,2 pour 100 près. Les mesures de résistances effectuées au pont de Wheatstone ne dépassent pas ordinairement l'approximation de 0,2 pour 100. La détermination électrolytique de l'intensité d'un courant peut atteindre l'approximation de 0,05 pour 100. L'évaluation des forces électromotrices au moyen de l'étalon Clark permet une approximation de 0,1 pour 100. Le coefficient de self-induction des bobines sans fer peut s'estimer à 0,3 pour 100 près; mais, avec les bobines à noyau en fer, l'erreur peut atteindre 3 à 4 pour 100. L'emploi des ampèremètres et des voltmètres usuels entraîne des erreurs généralement supérieures à 0,5 pour 100. Dans les mesures industrielles qui cumulent les erreurs du voltmètre et de l'ampèremètre, on ne dépasse ordinairement pas l'exactitude du centième. C'est la raison pour laquelle il est recommandé d'utiliser la *règle à calcul* pour les opérations numériques effectuées sur les résultats des mesures industrielles ([1]). Cet instrument, dans les mains d'une personne exercée, abrège les opérations, évite les erreurs grossières et épargne beaucoup de peine. Il a l'avantage de conserver sensiblement la même approximation à tous les calculs effectués sur une même échelle. Se prêtant au calcul des résultats au fur et à mesure que s'effectuent les observations, il permet, en cas d'erreur, de recommencer celles-ci pendant que l'expérience est encore montée. Pour les mesures industrielles, la règle de 26 cm ou celle de 52 cm suffisent. Pour les calculs plus précis, on peut utiliser la règle héliçoïdale de Fuller, qui procure une approximation de 0,02 pour 100. Ces utiles appareils constituent un outillage qui devrait se trouver sur la table de tous les ingénieurs, de même que les formulaires donnant les tableaux des carrés des nombres, des cubes, etc.

([1]) Sella et Montefiore, *Théorie et Pratique de la Règle à calcul*; Baudry, Paris.

Interpolation. — Il arrive fréquemment qu'on ne peut réaliser les conditions physiques requises pour amener un appareil de mesure dans une position déterminée. Par exemple, il se peut qu'on ne parvienne pas à graduer le courant qui traverse un galvanomètre de manière à amener l'aiguille sur une division δ donnée de l'échelle, mais qu'on connaisse deux intensités voisines i_1 et i_2, pour lesquelles l'aiguille occupe des positions δ_1 et δ_2, situées de part et d'autre de la position requise. Les valeurs des courants étant peu différentes, on est alors en droit d'admettre, si ce n'est pas la règle, que les déviations sont proportionnelles aux intensités dans les limites observées. Une simple proportion fournit la valeur du courant inconnu :

$$\frac{\delta_2 - \delta_1}{i_2 - i_1} = \frac{\delta - \delta_1}{x - i_1};$$

d'où l'on tire

$$x = i_1 + \frac{(\delta - \delta_1)(i_2 - i_1)}{\delta_2 - \delta_1}.$$

On ne peut extrapoler en dehors des limites d'observation en adoptant le procédé ci-dessus qu'à la condition de s'écarter très peu de ces limites.

Préparation d'un essai. Notes d'expérience. Rapports. Représentation graphique des résultats. — On ne doit exécuter un essai qu'après avoir étudié consciencieusement la méthode à employer et discuté, au préalable, les meilleures conditions d'expérience.

La méthode étant connue et un schéma bien net de l'installation ayant été tracé, on procède au placement des appareils d'essai en adoptant le plus grand ordre dans la disposition de ceux-ci. En ce qui concerne les connexions électriques, on ne saurait apporter trop de soin dans l'arrangement des fils, ni de propreté dans les contacts des conducteurs, des fiches et des clefs de circuit. Des négligences sous ce rapport entraînent souvent de longues recherches de dérangements. On évitera de tordre les fils de connexion sous forme de boudins qui accroissent inutilement la résistance et la self-induction des circuits.

Il faut se persuader que la préparation des expériences constitue la partie la plus difficile et souvent la plus longue d'un essai.

L'expérimentateur relève dans un carnet de notes toutes les observations au fur et à mesure que celles-ci sont exécutées. Les notes doivent être assez nettes pour qu'une personne au courant de la méthode d'essai puisse les comprendre.

On enregistre soigneusement les circonstances de l'essai, en commençant par la date et l'heure, la température de l'air ambiant et les autres conditions physiques. Pour avoir négligé de noter la température, on ne peut faire les corrections, souvent très importantes, que l'effet de celle-ci entraîne.

Les calculs conduisant aux résultats et la discussion de ceux-ci sont établis de manière à permettre de revoir aisément la suite des opérations.

Après l'essai, on dresse un rapport ou compte rendu de celui-ci. Le rapport rappelle la théorie de la méthode employée, donne une courte description des appareils utilisés, si ceux-ci n'ont pas été décrits déjà dans un rapport précédent; il énumère toutes les données d'expérience et reproduit bien nettement les calculs numériques, à l'aide des signes spéciaux; enfin, les résultats y sont mis en évidence sous forme de tableaux bien ordonnés.

Lorsque les résultats fournissent les variations d'une grandeur en fonction d'une autre grandeur indépendante, par exemple les variations de la résistance d'un conducteur en fonction de sa température ou celles de la force électromotrice d'une dynamo en fonction du courant débité, il est utile de représenter graphiquement ces variations en se servant de papier millimétré. On adopte, autant que possible, pour le rapport un format capable de contenir les feuilles de diagrammes non pliées. Le format du papier ministre est généralement suffisant. Après avoir choisi des échelles de coordonnées convenables, on porte les valeurs de la variable indépendante en abscisses et les résultats correspondants en ordonnées. Les points ainsi définis sont précisés par l'intersection des deux branches de petites croix ou par les centres de petits cercles. On trace alors, à la main ou au pistolet, la courbe moyenne qui satisfait le mieux aux points trouvés.

L'échelle des ordonnées peut différer de l'échelle des abscisses pour éviter des courbes qui s'étendent trop en longueur ou en hauteur. Il peut être utile, dans le même but, de commencer

à noter les ordonnées ou les abscisses à partir d'une valeur différente de o, ce qui correspond à un simple transport des axes de coordonnées.

Les représentations graphiques offrent de nombreux avantages. Elles permettent d'embrasser d'un coup d'œil l'ensemble des résultats, de juger de la concordance ou de la divergence des observations et d'interpoler des résultats intermédiaires ; en outre, elles permettent de juger, par analogie, de la forme de la fonction algébrique qui a le plus de chance de représenter la loi empirique du phénomène.

Si le diagramme est une droite ou s'en rapproche sensiblement, la fonction cherchée est évidemment

$$y = a + bx.$$

Comme l'on a, d'après la formule de Mac Laurin,

$$y = f(x) = f(o) + \frac{x}{1} f'(o) + \frac{x^2}{1.2} f''(o) + \ldots,$$

la fonction inconnue peut, en général, se mettre sous la forme

$$y = a + bx + cx^2 + \ldots,$$

si les coefficients décroissent rapidement.

On peut employer cette formule parabolique, réduite à trois termes, lorsqu'à une partie de courbe sensiblement rectiligne succèdent des ordonnées croissant plus rapidement que les abscisses.

Si l'on a affaire à une courbe dont la première partie est sensiblement rectiligne et dont les ordonnées croissent ensuite de moins en moins rapidement de manière à tendre vers une asymptote parallèle à l'axe des abscisses, on essaiera la fonction hyperbolique

$$y = \frac{ax}{1 + bx}.$$

C'est le cas de la courbe empirique du magnétisme de Frolich.

Si les ordonnées du diagramme croissent ou décroissent rapidement, il y a lieu de tenter une fonction exponentielle, telle que

$$y = ae^{bx}$$

ou

$$y = a e^{-bx}.$$

Enfin, si les ordonnées sont périodiquement positives et négatives, on trouve la solution dans une fonction circulaire

$$y = a \sin bx + a' \sin b'x + \ldots,$$

qui, dans beaucoup de cas, peut être réduite à un terme.

Les valeurs les plus probables des paramètres de ces fonctions se déterminent par l'application de la méthode des moindres carrés.

Il est prudent de ne pas attribuer une portée théorique à une fonction ainsi déduite empiriquement, parce qu'on serait conduit à des extrapolations erronées. Une extrapolation semblable a fait attribuer une limite nulle à la perméabilité du fer.

Unités de mesure. — *Unités fondamentales.* On ramène toutes les actions électriques à des forces et on les exprime par suite à l'aide des trois grandeurs primordiales : la longueur, la masse et le temps.

Les électriciens ont choisi pour mesurer ces grandeurs le *centimètre*, le *gramme* et la *seconde*.

Le centimètre est approximativement la billionième partie du quadrant terrestre; rigoureusement, il est la centième partie du mètre étalon conservé à l'établissement international de Sèvres.

Le gramme représente environ la masse d'un centimètre cube d'eau distillée au maximum de densité. Un étalon du kilogramme existe également à Sèvres.

La seconde est la 86 400me partie du jour solaire moyen.

Ces unités, dites *fondamentales*, sont représentées par les symboles [L], [M], [T].

La *valeur numérique* d'une quantité s'exprime par le rapport de celle-ci à l'unité choisie. Une longueur mesurée par un nombre l aura une valeur concrète égale à l [L]. Si l'on adopte une autre unité [L'], il viendra une valeur numérique l', telle que

$$l' [L'] = l [L], \qquad \text{d'où} \qquad \frac{l}{l'} = \frac{[L']}{[L]}.$$

On voit donc que la valeur numérique d'une quantité est en raison inverse de la grandeur de l'unité choisie.

Unités dérivées. Pour exprimer les diverses grandeurs physiques, on pourrait choisir des unités arbitraires et indépendantes les unes des autres. Cette méthode, suivie pendant longtemps, ne présente pas d'inconvénient quand les mesures sont directes. Mais le plus souvent on évalue les quantités au moyen d'unités d'espèces différentes, en se servant des méthodes indirectes ou absolues. Par exemple, pour mesurer une surface, on ne la compare pas directement avec un étalon de surface, mais on détermine ses éléments linéaires, à l'aide de l'unité de longueur, et l'on applique la relation existant entre la surface et ses dimensions.

Pour un carré s, de côté c, la relation est

$$s = kc^2.$$

Si $c = 1$, $s = k$.

Le facteur arbitraire k, qui représente la surface du carré ayant l'unité de côté, peut être égalé à 1. L'unité de surface ainsi déterminée est le carré dont les côtés sont égaux à un centimètre ; elle est liée à l'une des unités fondamentales et s'appelle, pour cette raison, unité dérivée de surface.

De même l'unité dérivée de volume est le cube ayant un centimètre de côté.

On peut ainsi définir des unités dérivées pour toutes les grandeurs physiques, en débarrassant de leurs coefficients arbitraires les relations qui unissent ces grandeurs entre elles.

Le *système d'unités* déterminé par ce procédé se désigne par les initiales des unités fondamentales choisies.

Le système C. G. S. d'unités, adopté par les électriciens, a pour base le centimètre, le gramme et la seconde.

Unités mécaniques dérivées. En poursuivant le procédé de raisonnement appliqué ci-dessus, on voit sans peine que l'unité de vitesse est la vitesse d'un mobile qui parcourt l'unité de longueur en l'unité de temps ; cette unité dérivée est la vitesse d'un centimètre par seconde.

L'unité de vitesse angulaire correspond à l'unité d'angle (arc égal au rayon) ou *radiant* parcouru en l'unité de temps.

L'unité d'accélération est l'accélération pour laquelle la vitesse s'accroît d'une unité par seconde.

L'unité de quantité de mouvement est la quantité de mouvement de l'unité de masse se déplaçant avec l'unité de vitesse.

L'unité de force, qui a reçu le nom de *dyne*, est la force qui, appliquée à l'unité de masse, lui imprime l'unité d'accélération.

L'unité usuelle de force est le *poids du gramme*, c'est à dire la force capable, sous notre latitude, d'imprimer à l'unité de masse une accélération approximativement égale à 981. Le gramme équivaut par conséquent à 981 dynes.

L'unité de travail, appelée *erg*, est le travail accompli par l'unité de force, dans sa propre direction, suivant l'unité de longueur.

L'unité usuelle de travail est le kilogrammètre, qui vaut 981×10^5 ergs.

L'unité de puissance ou *erg par seconde* est la puissance d'un moteur développant l'unité de travail en l'unité du temps.

Les unités usuelles de puissance sont le cheval-vapeur, qui équivaut à $75 \times 981 \times 10^5 = 736 \times 10^7$ ergs par seconde, et le poncelet, défini par le Congrès de Mécanique de 1889 comme équivalant à 100 kilogrammètres par seconde, soit 981×10^7 ergs par seconde.

L'unité de densité est la densité d'un corps qui contient l'unité de masse dans l'unité de volume.

L'unité de module d'élasticité est le module d'un corps qui, supportant l'unité de force par unité de section, prend un allongement égal à sa longueur primitive.

Unités C. G. S. magnétiques et électriques. L'existence de l'action magnétique du courant permet d'établir un système d'unités dans lequel toutes les grandeurs électriques et magnétiques sont définies en fonction d'un pôle.

L'unité de pôle magnétique, définie par la loi de Coulomb, est le pôle qui repousse un pôle égal situé à la distance d'un centimètre avec la force d'une dyne.

Les autres grandeurs magnétiques se mesurent à l'aide d'unités dérivées, définies par leurs relations avec l'unité de pôle rappelées ci-après [1] :

---

(1) ERIC GERARD, *Leçons sur l'Électricité* ; Gauthier-Villars, Paris.

Potentiel magnétique $\mathcal{V} = \Sigma \frac{m}{r}$.

Intensité de champ $\mathcal{H} = -\frac{d\mathcal{V}}{dl}$.

Moment magnétique $\mathcal{M} = l \Sigma m$.

Intensité d'aimantation $\mathcal{J} = \frac{\mathcal{M}}{v}$.

Densité superficielle $\sigma = \frac{m}{s}$.

Puissance d'un feuillet $\mathcal{P} = \sigma \varepsilon$.

Flux de force magnétique $\mathcal{N} = m \omega$.

Coefficient d'induction $\mathfrak{M} = \frac{\mathcal{N}}{\mathcal{P}}$.

Coefficient d'aimantation ou de susceptibilité $\kappa = \frac{\mathcal{J}}{\mathcal{H}}$.

Coefficient de perméabilité $\mu = 1 + 4 \pi \kappa$.

L'effet magnétique d'un courant est identique à celui d'un feuillet de même contour et de puissance égale à l'intensité du courant.

Un courant circulaire d'intensité i, de longueur l et de rayon r, par exemple, développe, sur l'unité de pôle placée au centre, une force

$$\mathcal{H} = \frac{l\,i}{r^2}.$$

On déduit de cette relation que l'unité d'intensité est l'intensité d'un courant circulaire de rayon unité produisant, par unité de longueur, l'unité de force sur l'unité de pôle placée au centre de l'arc.

L'unité de quantité d'électricité se déduit de la relation

$$q = i\,t.$$

C'est la quantité transportée par l'unité de courant en l'unité de temps.

La résistance électrique est liée à l'intensité du courant par la loi de Joule

$$W = i^2\,r\,t.$$

L'unité de résistance est, par suite, celle d'un conducteur dans lequel l'unité d'intensité développe l'unité de chaleur en l'unité de temps.

Le potentiel électrique, qui sert de mesure à la force électro-

motrice, trouve dans la loi d'Ohm une relation avec l'intensité et la résistance :

$$V - V' = e = i\,r.$$

L'unité de force électromotrice ou de différence de potentiel produit l'unité de courant dans un conducteur ayant l'unité de résistance.

La capacité d'un corps s'exprime, en fonction de la charge et du potentiel, par la formule

$$c = \frac{q}{v}.$$

L'unité de capacité est représentée par la capacité d'un conducteur qui contient l'unité de charge sous l'unité de potentiel.

Unités pratiques. Les unités C. G. S. électriques sont représentées par des quantités qui diffèrent beaucoup, en général, des grandeurs qu'on rencontre dans les applications. Ainsi, la résistance électrique de 100 m de fil de fer de 4 mm de diamètre équivaut à environ un milliard d'unités de résistance.

Afin de n'être pas obligé d'employer des nombres très forts ou très faibles pour exprimer les grandeurs usuelles, on a adopté des unités pratiques représentées par des multiples des unités C. G. S. C'est pour une raison semblable que l'unité de longueur du système métrique, définie par la Convention Nationale, est, non pas le quadrant terrestre, mais sa $\frac{1}{10^7}$ partie.

L'unité pratique de résistance, qui a reçu le nom d'*ohm*, est égale à 10^9 unités C. G. S. de résistance. Cette unité est représentée par un étalon constitué au moyen d'une colonne de mercure d'un millimètre carré de section. Des expériences poursuivies jusqu'en 1884 ont établi que la longueur de la colonne correspondant à la résistance d'un ohm est, à la température de 0° C, voisine de 126 centimètres, ce qui a fait proposer cette longueur pour la définition de l'*ohm légal*, faisant foi dans les transactions commerciales. Toutefois, cette proposition n'a pas rencontré la sanction des États. Comme, d'ailleurs, des expériences plus précises, exécutées depuis 1884, ont montré que l'*ohm vrai* est représenté, avec une approximation de 1/5000, par la résistance, à la tempéra-

ture de la glace fondante, d'une colonne mercurielle de 14,4521 grammes, d'une section transversale constante et d'une longueur de 106,3 cm, cette dernière définition a été agréée par le Congrès de Chicago sous le nom d'*ohm international*.

L'unité pratique d'intensité, appelée ***ampère international***, est égale au dixième de l'unité C. G. S.

Les recherches expérimentales ont montré qu'un courant de cette intensité dépose, en une seconde, 1,118 mmg. d'argent et 0,327 mmg. de cuivre, en décomposant un sel de ces métaux.

En appliquant les relations connues entre les grandeurs électriques, on déduit de ces deux unités les autres unités du système pratique.

L'unité pratique dérivée de force électromotrice, appelée ***volt international***, est la force électromotrice qui, appliquée à un conducteur dont la résistance est un ohm international, produit un courant égal à un ampère international.

L'unité de quantité, le ***coulomb international***, est égale au dixième de l'unité C. G. S.

L'unité de capacité, le ***farad international***, est la capacité d'un conducteur chargé d'un coulomb international au potentiel d'un volt international.

L'unité pratique de travail ou d'énergie électrique, correspondant à 1 volt-coulomb, s'appelle ***joule***.

$$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ ergs}$$
$$= \frac{1}{9,81} \text{ kilogrammètre.}$$

L'unité pratique de puissance électrique, qui représente le volt-ampère, a reçu le nom de ***watt***.

Le kilowatt vaut 1,36 cheval-vapeur. L'emploi de cette unité est recommandé pour désigner la puissance des machines motrices, concurremment avec le ***poncelet***, lequel équivaut à 100 kilogrammètres par seconde ou 0,981 kilowatt environ.

Il est à remarquer que les unités pratiques pourraient se déduire directement des équations entre les grandeurs électriques, à la condition de choisir comme unités fondamentales, au lieu du centimètre et du gramme, 10^9 centimètres, soit environ la longueur du quadrant terrestre, et la $\frac{1}{10^{11}}$ partie du gramme; la seconde étant conservée pour l'unité de temps.

Les coefficients d'induction étant homogènes à une longueur, seront exprimés en centimètres dans le système C. G. S. et en billions de centimètres dans le système pratique. Les Américains ont adopté pour l'unité pratique de coefficient d'induction le nom de *henry*, qui a été sanctionné par le Congrès international de Chicago. Auparavant, cette unité était appelée, en Europe, *secohm* ou *quadrant*.

Le tableau suivant réunit les noms adoptés pour les unités magnétiques et électriques y compris les dénominations de Gauss et Maxwell admises par le Congrès de 1900 pour les unités C. G. S. d'intensité de champ et de flux de force magnétique.

Le système d'unités adopté par les électriciens a donné lieu à diverses critiques.

Heaviside a fait observer que la définition de l'unité de pôle magnétique acceptée, a l'inconvénient de ne pas tenir compte de la perméabilité du milieu et qu'elle conduit au facteur 4π incommode dans les calculs. Pour éviter ce dernier, il a proposé un système d'unités, dit *rationnel*, dans lequel le pôle unité est celui qui repousse un pôle égal placé à 1 cm avec une force de 4π dynes. Ce système a lui-même le défaut d'introduire le facteur incommensurable 4π dans le rapport entre les nouvelles unités et les anciennes. M. Fessenden a remarqué que si l'on considère la perméabilité de l'éther comme égale à 4π au lieu de l'unité, on évite ce facteur, sauf pour deux des unités.

Sans être aussi radical, M. Blondel estime qu'à l'heure actuelle le *système pratique* avec ses divers exposants de 10 est compliqué et que rien n'empêcherait de prendre pour unité usuelle de courant l'unité C. G. S. et pour unité usuelle de potentiel 10^9 unités C.G.S. Dans ces conditions, les rapports entre les unités usuelles et les unités C. G. S. seraient toujours 1 ou la puissance 9e de 10.

Quels que soient les mérites de ces propositions, il ne faut pas perdre de vue qu'il a fallu des années pour faire admettre les unités électriques actuelles par les praticiens et que des lois les ont consacrées dans divers pays. De nouvelles unités, de nouveaux noms, seront donc difficilement sanctionnés par l'usage.

GRANDEURS	SYMBOLES	NOMS PROPOSÉS PAR LE CONGRÈS DE 1900	UNITÉS PRATIQUES	
			NOMS	VALEURS EN UNITÉS C. G. S.
Intensité de pôle	m	—	—	—
Moment magnétique.	$\mathcal{M}$	—	—	—
Intensité d'aimantation. . . .	$\mathcal{J}$	—	—	—
Intensité de champ	$\mathcal{H}$	*Gauss*	—	—
Flux de force magnétique . . .	$\mathcal{N}$	*Maxwell*	—	—
Induction magnétique	$\mathcal{B}$	—	—	—
Perméabilité	μ	—	—	—
Susceptibilité	$\varkappa$	—	—	—
Reluctance (résist. magnétique .	$\mathcal{R}$	—	—	—
Résistance	R, r	—	Ohm.	10^9
Conductance	—	—	Mho.	10^{-9}
Force électromotrice	E, e	—	Volt.	10^8
Différence de potentiel	V, v	—	Volt.	10^8
Intensité de courant.	I, i	—	Ampère.	10^{-1}
Quantité d'électricité	Q, q	—	Coulomb. Ampère-heure.	10^{-1} 360
Capacité	C, c	—	Farad.	10^{-9}
Energie.	W	—	Joule. Watt-heure.	10^7 36×10^9
Puissance	P	—	Watt.	10^7
Résistibilité.	ρ	—	Ohm-centimètre.	10^9
Conductibilité	γ	—	—	10^{-9}
Inductance	$\mathcal{L}$, $\mathcal{M}$	—	Henry.	10^9
Force magnétisante	$\mathcal{H}$	—	—	—
Force magnétomotrice	$\mathcal{F}$	—	—	—

Chapitre II.

MESURES GÉOMÉTRIQUES ET MESURES MÉCANIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Longueur et diamètre des conducteurs cylindriques. Jauge Palmer. Jauge à cadran. — La mesure de la résistibilité des conducteurs amène à déterminer leur longueur et leur diamètre. Lorsque ces conducteurs sont formés de fils cordés, il convient de mesurer séparément l'un des brins du câble.

Si la longueur considérée est de l'ordre du mètre, on se sert d'un mètre étalon, divisé en millimètres, le long duquel on tend le conducteur, après avoir tracé deux repères sur celui-ci. A l'œil nu, on juge de la longueur à moins d'un millimètre près. Avec une loupe, on peut apprécier la longueur avec une exactitude qui varie du $^1/_{5000}$ au $^1/_{10000}$, suivant l'habileté de l'observateur. La correction pour la température est négligeable dans une mesure de ce genre.

La mesure des diamètres s'effectue le plus souvent à l'aide de la *jauge Palmer*. L'appareil comprend un étrier E E′ (fig. 1), dont une des branches est traversée par une vis butoir *b* et l'autre par une vis micrométrique *v* dont le pas correspond généralement à $^1/_2$ mm.

La tête de cette dernière vis porte un manchon M qui entoure l'écrou E'. Le conducteur est serré entre les deux vis. L'écartement de celles-ci se lit sur une graduation rectiligne qui indique le nombre de tours de la vis micrométrique. Les fractions de tour se

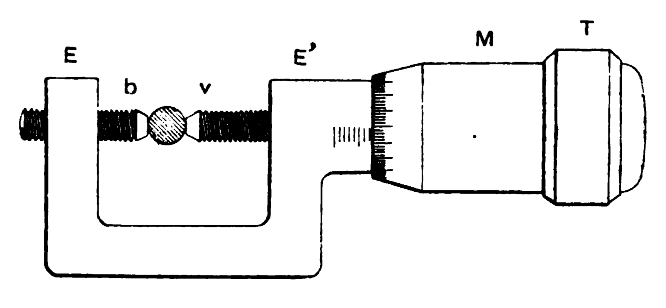


Fig. 1.

mesurent à l'aide de la graduation circulaire tracée sur la base du manchon M et divisée d'ordinaire en 50 parties. Lorsque la vis mobile touche le butoir, il faut que le zéro de la graduation circulaire corresponde exactement au zéro de la graduation rectiligne. Le réglage se fait par la vis *b*.

Afin de ne pas déformer le fil par la pression, on n'agit pas directement sur le manchon M, mais on tourne ce dernier à l'aide d'une tête T, qui glisse à frottement doux sur le manchon.

Pour la mesure des fils minces, on utilise une *jauge à cadran*. Le fil est placé entre un butoir d'agate fixe *b* (fig. 2) et un butoir semblable *b'* porté par un levier *l* pivotant autour d'un point O. Ce levier porte un secteur denté *s*, qui engrène avec un pignon *p*, fixé sur l'axe d'un autre secteur *s'*. Ce dernier fait tourner un pignon *p'* qui entraîne une aiguille se déplaçant devant un cadran. 100 divisions de ce dernier correspondent généralement à 1 mm d'écartement des butoirs. La pression du butoir *b'* sur le fil est très légère ; elle est donnée par un secteur *s''* qui engrène avec *p'* et dont l'axe est sollicitée par un ressort spiral S.

Les fils ayant une section très variable par suite de l'usure et de la déformation de la filière, il est nécessaire, pour obtenir le diamètre moyen, de comparer les épaisseurs dans une même section et de mesurer les variations du diamètre dans des sections équidistantes.

Lorsqu'on connaît le poids spécifique δ du métal employé, la

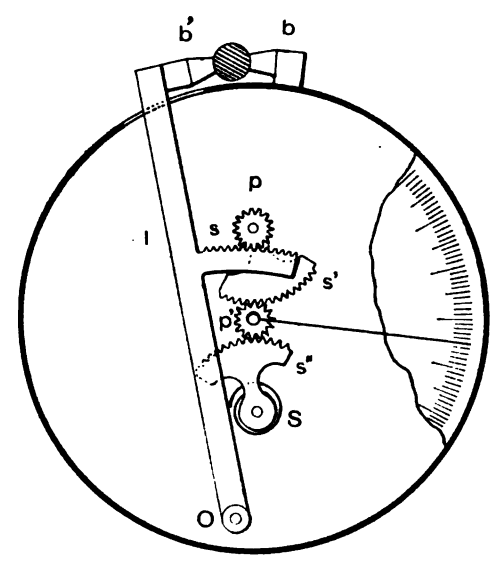


Fig. 2.

détermination la plus exacte du diamètre moyen d consiste dans la pesée d'une longueur connue l de fil. On a

$$d = \sqrt{\frac{4p}{\pi l \delta}},$$

p étant le poids trouvé.

Mesure des angles. Lecture directe. Lecture par réflexion. Méthode subjective et méthode objective. — L'une des mesures les plus fréquentes que les électriciens aient à effectuer est celle des angles, qui peut se ramener à la comparaison de deux longueurs, celle de l'arc et celle du rayon. L'unité d'angle est le *radiant* pour lequel l'arc est égal au rayon. Elle correspond en degrés du cercle à

$$\frac{360^\circ}{2\pi} = 57^\circ\ 17'\ 44''.$$

S'il s'agit de lire l'angle compris entre deux positions d'une aiguille aimantée portée par un pivot ou suspendue par un fil

flexible, la méthode la plus simple consiste à fixer à l'aiguille un index effilé qui se déplace sur un cercle divisé en degrés, dont le centre est sur la verticale passant par le point de suspension de la tige aimantée. Afin d'éviter l'erreur de parallaxe, on fixe un miroir dans le plan de la graduation et l'on dispose l'œil de manière que l'index se confonde avec son image dans la glace. La lecture se fait ainsi dans un plan normal à la graduation. Ce mode direct de lecture ne permet pas une grande précision lorsque les angles sont faibles, à cause de la petite longueur des aiguilles indicatrices.

Pour apprécier les petits angles, on adopte les *lectures par réflexion*. On fixe à la pièce mobile un miroir et l'on détermine l'angle que fait un faisceau lumineux projeté sur le miroir avec le rayon réfléchi. Cet angle est précisément double de celui dont le miroir et, par suite, la pièce mobile ont tourné. On obtient de la sorte un faisceau indicateur auquel on peut donner une longueur de plusieurs mètres.

Il y a deux manières distinctes d'effectuer la lecture par réflexion. La première, due à Poggendorff et à Gauss, peut s'appeler méthode subjective. La seconde, imaginée par Lord Kelvin, est la méthode objective.

Méthode subjective. — On fixe au système mobile un miroir plan passant par l'axe de rotation ou situé légèrement en avant de cet axe. La fixation se fait à l'aide de quelques gouttelettes d'une solution de caoutchouc dans la benzine, ou mieux à l'aide de trois griffes qui soutiennent les bords du miroir. Ce dernier moyen évite la déformation de la glace qui peut résulter de la dessication de la colle.

Devant le miroir se place une lunette à réticules croisés, supportée par un trépied à vis calantes et portant une échelle horizontale (fig. 3). Celle-ci se dispose à une distance de 1 à 3 mètres du miroir, normalement à l'axe optique de la lunette, qui est elle-même orientée de manière que le plan vertical passant par son axe optique soit perpendiculaire au miroir dans sa position de repos et passe par son centre (fig. 4).

On place le support de la lunette de niveau au moyen des vis calantes, et l'on règle la position de l'oculaire et l'inclinaison de la lunette jusqu'à ce qu'on voie, dans le miroir, l'image du zéro

de l'échelle. Il faut que le rayon incident qui tombe sur le miroir soit normal à l'échelle. On peut s'assurer que cette condition est

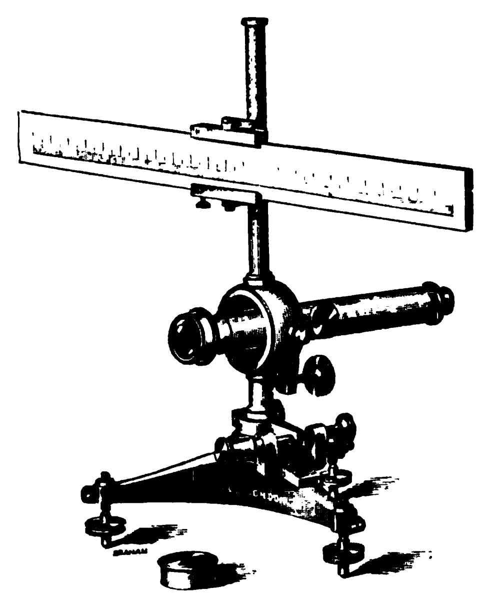


Fig. 3.

satisfaite en tournant l'échelle de 90° ; le miroir doit alors se trouver dans la direction de l'échelle.

On vérifie ensuite si, en déplaçant angulairement le miroir de quantités égales de part et d'autre de la position d'équilibre, on lit des écarts égaux sur l'échelle.

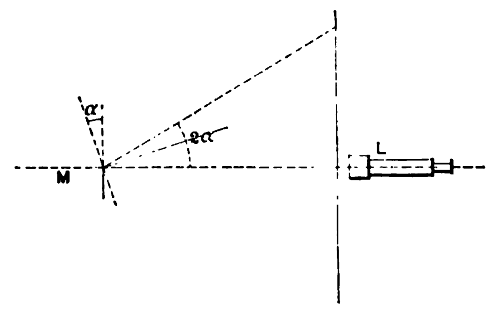


Fig. 4.

Les chiffres indiquant les divisions sont doublement renversés, afin de permettre l'emploi d'une lunette à deux lentilles. Le zéro de la graduation peut se trouver au milieu de l'échelle ou à l'une des extrémités. Dans le premier cas, les divisions de part et d'autre du zéro sont distinguées par des colorations différentes, rouge d'un côté, noire de l'autre. Il est souvent difficile d'assurer un bon éclairage de l'échelle. Les échelles tracées sur papier blanc doivent, le jour, être disposées en face d'une fenêtre et, le soir, être éclairées par une rampe à gaz ou par des lampes à incandescence. Les jets de gaz sont disposés au dessus du rayon visuel pour que le mouvement de l'air chaud ne gêne pas les lectures. Lorsqu'on emploie des lampes à incandescence, il convient de vérifier éventuellement si le courant qui les traverse n'influence pas le galvanomètre voisin. On doit à MM. Siemens et Halske des lampes à incandescence à longs filaments droits qui conviennent spécialement pour l'éclairage des échelles. Parfois, celles-ci sont en verre dépoli et éclairées par transparence.

Il résulte des dispositions décrites ci-dessus que, pour un angle de déviation α de l'aiguille, on lit dans la lunette une longueur δ telle que

$$\text{tang } 2\alpha = \frac{\delta}{l},$$

l étant la distance du miroir à l'échelle.

On déduit de là

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{ arc tang. } \frac{\delta}{l} = \frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{l} - \frac{1}{3}\frac{\delta^3}{l^3} + \frac{1}{5}\frac{\delta^5}{l^5} \cdots\right).$$

Si les angles sont inférieurs à 3°, il suffit de retenir

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{\delta}{l} - \frac{1}{6}\frac{\delta^3}{l^3}.$$

On peut éviter ce calcul en adoptant une échelle courbée en arc de cercle de rayon l. On a alors rigoureusement, en appelant θ la longueur lue sur la graduation,

$$\alpha = \frac{1}{2}\frac{\theta}{l}.$$

La méthode subjective est très précise, mais elle est fatigante pour la vue. Dans les mesures industrielles, on lui préfère la méthode objective.

Méthode objective. Pour exécuter cette méthode, on remplace habituellement le miroir plan par un miroir concave. A la lunette on substitue une lampe placée derrière l'échelle et envoyant un pinceau de lumière sur le miroir, grâce à une ouverture percée sous le milieu de l'échelle (fig. 5). Celle-ci est placée à une distance et dans une position telles que l'image de la flamme vienne se projeter sur le milieu de la graduation ; on trouve rapidement l'emplacement convenable de l'échelle en déplaçant devant celle-ci une feuille de papier sur laquelle se projette la tache lumineuse. Si l'appareil mobile est pourvu d'un miroir plan, on concentre les rayons à l'aide d'une lentille convergente placée sur le parcours



Fig. 5.

du faisceau incident. Les lectures se font dans un demi-jour, afin de distinguer nettement l'image. Celle-ci a la forme d'un trait lumineux si l'orifice qui livre passage au faisceau est une fente verticale. On lit alors les divisions limitées par l'un des bords de l'image. Il est préférable d'employer une ouverture circulaire ou carrée traversée par un fil vertical. On obtient ainsi une image coupée par l'ombre du fil.

Ces systèmes présentent l'inconvénient d'obliger l'opérateur à se tenir penché entre l'échelle et l'appareil pour faire les lectures.

Une amélioration notable consiste à tracer la graduation sur une échelle translucide, en toile à calquer, par exemple. Dans ce cas, l'image est très nette pour un observateur placé derrière l'échelle sur le prolongement du faisceau réfléchi. Les lampes à flamme employées avec ces échelles se placent sur le côté, dans une lanterne, et leur lumière est dirigée sur le système mobile par un miroir incliné placé derrière le milieu de la graduation (fig. 6).

Lorsqu'on utilise des appareils de mesure peu influençables par les courants voisins, on peut employer comme source lumineuse une lampe à incandescence, qui se dispose derrière l'échelle. La partie rectiligne du filament, émettant un faisceau lumineux à travers un orifice percé dans la lanterne, donne sur la graduation une image très nette, qui peut être vue dans une salle éclairée par la lumière diffuse du jour, lorsque l'observateur a le soin de tourner

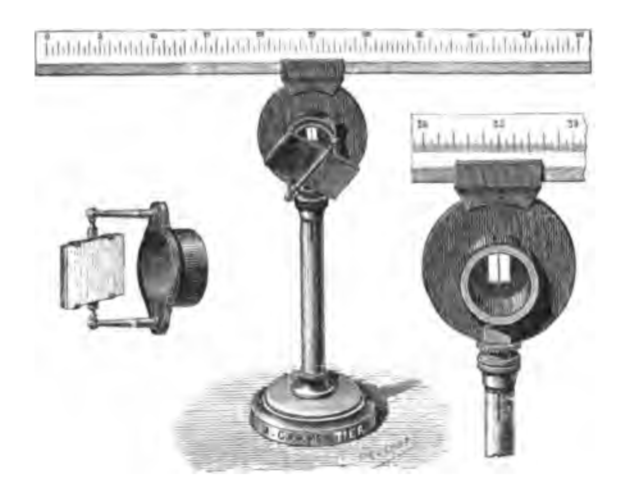


Fig. 6.

le dos aux fenêtres ou de placer l'échelle perpendiculairement à celles-ci.

Si l'on veut que l'image allongée du filament vertical soit transformée en un point très brillant, spécialement pour les enregistrements photographiques, on place, comme l'a conseillé M. Boys, sur le parcours du rayon réfléchi une lentille cylindrique dont l'axe est horizontal et qui permet la libre déviation de la lumière dans le sens de la graduation.

Avec une échelle droite placée à 130 cm de l'appareil de mesure et dont la graduation s'étend à 25 cm de part et d'autre du zéro, l'erreur de proportionnalité maxima commise en substituant la tangente à l'angle n'atteint pas 1 pour 100. L'erreur est nulle si l'on courbe l'échelle suivant un arc de cercle dont le miroir occupe le centre.

Mesure des forces faibles. Divers modes de suspension des équipages mobiles. — Dans les appareils de mesure on doit souvent équilibrer des forces électriques ou magnétiques de faible intensité. On adopte, dans ce but, soit la réaction d'un champ magnétique sur un aimant, soit l'action de la pesanteur, soit la force élastique d'un fil ou d'un ressort de suspension.

Dans un galvanomètre à aimant mobile, c'est le champ magnétique terrestre qui fait équilibre à l'action électromagnétique du courant. Si l'action terrestre est trop faible, on peut y ajouter celle d'un aimant directeur fixe, placé dans le voisinage de l'aiguille

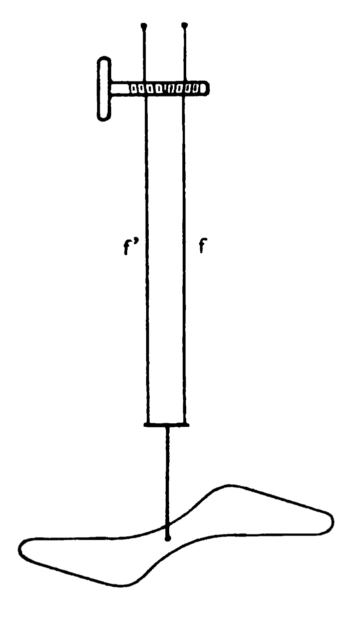


Fig. 7.

mobile de manière à exercer un couple qui vient en aide au couple terrestre. Au contraire, on réduit la force antagoniste, en orientant l'aimant directeur de telle sorte que l'action terrestre soit neutralisée en tout ou en partie.

On a un exemple de l'emploi de la pesanteur comme force antagoniste lorsqu'on équilibre l'attraction de deux bobines plates

parallèles et horizontales, traversées par des courants de même sens, en fixant la bobine mobile à l'un des bras du fléau d'une balance dont l'autre bras porte un plateau qu'on charge de poids.

Un autre exemple est la suspension bifilaire des électromètres à quadrants. Lorsqu'une palette électrisée est soumise à un couple situé dans le plan horizontal, on peut équilibrer ce couple en suspendant la palette à deux fils minces, ff' (fig. 7), légèrement écartés. Par suite du déplacement angulaire de la palette, le centre de gravité du système remonte, ce qui produit un couple antagoniste qui, pour les déviations faibles, est proportionnel à l'angle de torsion, à l'écartement des fils, au poids suspendu et inversement proportionnel à la longueur de la suspension. Ce système n'est guère employé que lorsqu'il est nécessaire de pouvoir varier le couple antagoniste, ce qui est possible en modifiant l'écartement des brins. Pour cela, on fait passer ceux-ci sur les deux moitiés d'une vis présentant deux séries de filets de sens inverses. En tournant cette vis dans un sens les deux brins se rapprochent, tandis qu'ils s'éloignent si l'on tourne la vis dans le sens opposé.

La pesanteur sert enfin de force antagoniste dans un grand nombre de galvanomètres industriels où l'action électromagnétique est équilibrée par des poids exerçant des couples variant avec les déplacements du système mobile.

Réaction élastique. La suspension unifilaire est l'exemple le plus fréquent d'une réaction élastique antagoniste. Son action est souvent combinée à l'une des précédentes. C'est Coulomb qui, le premier, a utilisé la réaction de torsion d'un fil pour mesurer les couples électriques. Il a reconnu expérimentalement que le couple de torsion d'un fil vertical détourné de sa position d'équilibre, est proportionnel à l'angle de déviation, à la 4e puissance du diamètre du fil et inversement proportionnel à la longueur de celui-ci :

$$c = k\frac{d^4}{l}\alpha.$$

Le coefficient k varie avec la nature du fil et sa température ; il est proportionnel au module d'élasticité du fil.

L'influence considérable du diamètre fait rechercher les corps les plus tenaces, qui permettent de réduire cet élément autant que

possible. Parmi les corps conducteurs, l'argent, le bronze phosphoreux et le bronze d'aluminium sont particulièrement avantageux, eu égard aux rapports de leur élasticité à leur ténacité ; ils sont fixés par une soudure à l'étain. Mais certains isolants sont très supérieurs aux conducteurs à cet égard, la soie et le quartz entr'autres.

Les fils de cocon, les plus employés pour les appareils de grande sensibilité, ont une ténacité 13 fois supérieure à celle des fils d'argent, ce qui permet de réduire considérablement le diamètre et, par suite, la réaction de torsion de ces fils. Si le poids à supporter est lourd, on réunit plusieurs brins en un faisceau. Le couple de torsion est alors à peu près égal à la somme des couples fournis par les divers fils composants.

Pour préparer une suspension, on dévide les fibres intérieures d'un cocon dégraissé au moyen d'une lessive alcaline. On sépare les deux brins qui composent chaque fil et l'on détord ces brins en y suspendant un poids pendant quelques semaines. Les fils ainsi apprêtés sont liés aux pièces qu'ils doivent supporter. On assure l'invariabilité des nœuds par une gouttelette de gomme-laque.

Le fil de cocon a l'inconvénient de se tordre sous l'influence des variations hygrométriques de l'air. M. Vernon Boys a évité cet inconvénient en substituant à la soie des fils de quartz qu'on obtient sous une grande ténuité en étirant rapidement une gouttelette de quartz fondu au chalumeau oxhydrique. Ces fils jouissent d'une ténacité extrême. Ils se fixent au moyen de cire à cacheter.

Depuis quelques années, on utilise des fils métalliques aplatis qui, à ténacité égale, possèdent une sensibilité à la torsion supérieure à celle des fils ronds. MM. Ayrton et Perry ont comparé deux fils de suspension de même section, l'un rond de 0,254 mm de diamètre, l'autre rectangulaire de 0,7128 mm sur 0,0712 mm. Pour un même couple, la déviation est 5 fois plus grande avec le second fil, l'effet de cisaillement est moitié moindre, ce qui diminue les chances de déplacement du zéro, et, dans le cas où la suspension doit être traversée par un courant, le refroidissement est à peu près double avec la bande.

On doit donner à la suspension unifilaire une assez grande longueur, lorsque les angles de torsion dépassent quelques degrés, afin de ne pas atteindre la limite d'élasticité, ce qui produirait une torsion permanente.

Pour réduire la longueur des suspensions et, par suite, la hauteur des appareils, on utilise la disposition suivante : la force directrice est développée par un boudin métallique dans l'axe duquel est tendu un fil de soie qui supporte l'équipage mobile. Un tel système est susceptible de résister à des torsions considérables. La permanence des ressorts à boudin est remarquable. M. Kohlrausch cite un ressort d'acier dont l'élasticité n'a pas varié de 1 pour 1000 en 7 ans. Le couple de torsion d'un fil enroulé en hélice est à peu près équivalent à celui d'un fil droit de même section et d'une longueur égale à la longueur développée de l'hélice ; il est d'ailleurs indépendant du rayon de l'hélice.

Pour fabriquer des ressorts réguliers, on enroule le fil en spires serrées sur un mandrin cylindrique, puis on use la surface extérieure du boudin, de manière à supprimer les fibres les plus déformées. Le boudin garde alors la forme qu'on lui a donnée.

Enfin, dans quelques appareils, on fait usage de ressorts directeurs en forme de spiral, en réduisant ainsi au minimum l'espace occupé en hauteur ; l'équipage mobile pivote alors entre pointes.

Il faut éviter les ressorts en matière magnétique qui sont susceptibles d'être influencés par les aimants et les courants.

La chaleur fait varier l'élasticité des fils métalliques. Le coefficient de torsion à t° est

$$K_t = K_0 (1 - \alpha t - \beta t^2).$$

Pour le cuivre,

$$\alpha = 5,2 \times 10^{-4} \text{ et } \beta = 2,8 \times 10^{-7}.$$

Ces variations sont négligeables dans les appareils industriels.

Quelquefois, on utilise l'allongement des ressorts à boudin pour mesurer des efforts dirigés suivant leur axe. Les allongements élastiques sont sensiblement proportionnels aux efforts qui les déterminent ; mais ils ont l'inconvénient d'être très faibles et partant difficiles à apprécier avec exactitude, sans le secours de procédés optiques ou mécaniques spéciaux.

MM. Ayrton et Perry ont remarqué que, lorsqu'on suspend un poids à un ressort à boudin fixé par le haut, l'extrémité inférieure

tend à tourner d'un angle proportionnel à la tension. Pour évaluer cette rotation avec exactitude, il suffit de fixer à l'extrémité libre une longue aiguille indicatrice normale à l'axe du ressort.

Lorsque l'axe d'un équipage mobile est horizontal, on le supporte entre des fils tendus ou sur couteaux; ceux-ci sont avantageusement remplacés par des pointes qui donnent une ligne de support bien nette.

Les équipages tournant entre pointes doivent avoir des pivots très durs, en osmiure d'iridum par exemple, portant sur des chapes en agate. On évite le serrage excessif des pivots en montant l'une des chapes sur ressort.

Mesure des temps. — Un assez grand nombre de mesures électriques entraînent la détermination de la durée d'un phénomène. Tel est le cas pour l'estimation de la durée d'une oscillation complète du système mobile d'un galvanomètre animé d'un mouvement périodique isochrone. On observe le passage du système oscillant par sa position d'équilibre ou par l'une de ses positions extrêmes, à l'aide de l'un des procédés décrits pour la mesure des angles, et l'on estime, à l'aide d'un chronomètre, la durée d'un nombre déterminé d'oscillations complètes.

Les *compte-secondes* employés à cette fin sont des appareils dans lesquels l'aiguille des secondes peut être mise en mouvement à l'instant précis du commencement des observations et arrêtée à la fin de celles-ci, en appuyant simplement le doigt sur un bouton.

Pour les expériences très précises, on préfère les *compte-secondes à pointage*, dans lesquels, au lieu d'arrêter l'aiguille, on inscrit, par un point noir sur le cadran, la position de l'aiguille des secondes au moment des passages ou des séries de passages.

Enregistrement des déviations. Procédé de Richard. Procédé photographique. Méthode de l'auteur. Méthode de Frôlich. Méthode de Blondel. — Lorsque les oscillations sont très rapides, il est préférable de recourir à leur enregistrement.

Nous indiquerons, à cette occasion, les procédés généraux employés pour enregistrer les déviations des systèmes mobiles autour d'un axe.

Il est souvent utile d'inscrire automatiquement les déviations d'un galvanomètre. Un enregistreur remplit l'office d'un observateur fidèle et infatigable lorsqu'il s'agit de phénomènes à allure lente. Il permet aussi de saisir au vol et d'inscrire des déplacements qui, par leur rapidité, échappent à l'analyse de nos sens.

La fig. 8 montre l'appareil Richard utilisé pour enregistrer les déviations de l'aiguille d'un wattmètre.

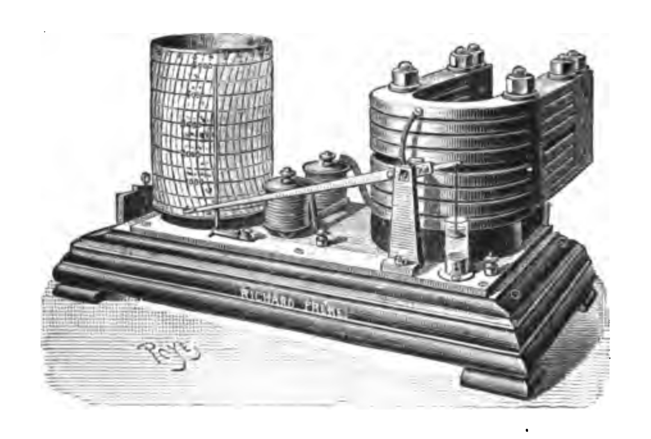


Fig. 8.

La pièce mobile porte une tige flexible terminée par une plume remplie d'encre à base de glycérine. L'absorption de l'humidité de l'air par la glycérine entretient la limpidité de l'encre. Cette plume appuie contre un tambour recouvert de papier divisé et animé d'un mouvement de rotation, grâce à un mécanisme d'horlogerie intérieur. La combinaison des déplacements de la plume et du tambour trace sur le papier une courbe continue qui représente les déviations en fonction du temps.

Ce procédé n'est pas applicable à l'enregistrement des oscillations rapides; il ne peut pas non plus être utilisé avec des galvanomètres

à suspension délicate, dont les déplacements seraient gênés par le frottement de la plume sur le tambour. On préfère alors enregistrer les oscillations par un procédé photographique.

Le système mobile est placé dans une chambre obscure devant un cylindre animé d'un mouvement de rotation rapide et aussi uniforme que possible. Un faisceau de lumière, provenant d'une lampe, est projeté sur un miroir que porte le système oscillant et réfléchi sur une feuille de papier photographique sensible recouvrant le cylindre enregistreur. Le faisceau est concentré à l'aide de lentilles de manière à donner une image bien nette sur le papier. Si l'on veut obtenir une image très réduite, on envoie par une fente étroite un faisceau de lumière qui est coupé près du papier par une fente perpendiculaire à la précédente. Les oscillations sont enregistrées sous forme d'une courbe périodique que le développement de la feuille sensible fait apparaître. Pour graduer les abscisses de la courbe, qui figurent les temps, on enregistre à côté de celle-ci les oscillations d'un diapason de période connue. A cette fin, un miroir est fixé sur l'une des branches du diapason dont le mouvement est entretenu par un mécanisme analogue à celui des sonneries trembleuses. Grâce à un faisceau de lumière réfléchi par le miroir, on obtient sur le cylindre enregistreur une courbe périodique constituant l'échelle des temps.

L'auteur a simplifié ce procédé.

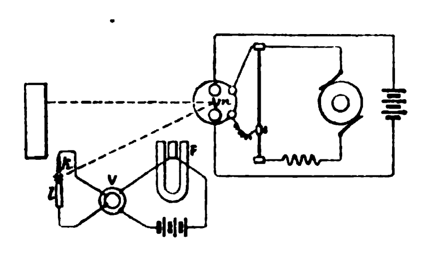


Fig. 9.

Dans la fig. 9, *m* représente le miroir concave d'un galvanomètre traversé par des courants à variations rapides. Sur ce miroir

on envoie un faisceau lumineux intermittent produit par l'étincelle secondaire d'une bobine d'induction V, éclatant entre une pointe de charbon *l* et un fil épais de magnésium *k*. Les interruptions du circuit primaire de la bobine sont réglées par un électro-diapason F. Le faisceau lumineux, réfléchi par le miroir et concentré par une grande lentille biconvexe, vient former une image de l'étincelle sur une feuille de papier sensible tendue, soit sur un cylindre possédant un mouvement rotatif, soit sur une planchette verticale animée d'un mouvement de descente. On obtient ainsi une courbe pointillée lors du développement de l'image ; en menant par les points successifs des normales à la direction du déplacement du papier, on gradue l'axe des temps en intervalles de durée égaux et déterminés.

S'il n'est pas nécessaire de connaître la valeur des intervalles, mais si l'on désire simplement diviser l'axe des temps en parties d'égale durée, on peut, au lieu du diapason, employer simplement le ressort interrupteur de la bobine de Ruhmkorff. Pour obtenir une étincelle bien nette, on ajoute une bouteille de Leyde en dérivation par rapport aux bornes secondaires.

Afin de montrer à un auditoire la forme des courbes représentant les courants périodiques, M. Frolich fait usage du dispositif représenté dans la fig. 10. Une lampe à arc envoie un faisceau lumineux convergent sur un petit miroir fixé, vers le milieu du

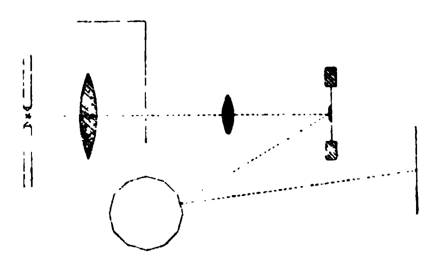


Fig. 10.

rayon, au diaphragme d'un téléphone parcouru par les courants étudiés. Les rayons réfléchis vont frapper un prisme dont les faces sont couvertes de miroirs plans et auquel on imprime un mouvement de rotation rapide. Le faisceau est enfin reçu par

un écran translucide. Lorsque la vitesse de rotation des miroirs tournants est convenablement réglée par rapport à la période des courants qu'il s'agit de représenter, et lorsque ceux-ci se succèdent assez rapidement, on voit sur l'écran, en vertu de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, les courbes figurant les ondulations des courants. En remplaçant l'écran par une plaque photographique, on peut enregistrer les ondulations.

Voici un autre procédé imaginé par M. Blondel pour atteindre le même résultat. Le trait lumineux vertical ou le filament de la lampe à incandescence qui éclaire le miroir porté par l'équipage oscillant, est placé derrière un disque percé de fentes radiales et tournant autour d'un axe horizontal. Le disque est entraîné par un moteur réglé de manière que chaque fente radiale défile devant le filament pendant la durée d'une période. On obtient ainsi l'effet d'un point lumineux qui se déplace et dont l'image réfléchie décrit sur un écran ou sur une plaque photographique une courbe figurant le mouvement du miroir mobile.

Mesure des vitesses. — Les essais des dynamos conduisent à déterminer le nombre de révolutions d'axes mobiles dont le mouvement peut être considéré comme uniforme pendant un temps donné. Pour arriver à ce résultat, on adapte à l'arbre mobile un *compte-tours* qui indique soit par une aiguille se déplaçant sur un cadran gradué, soit à l'aide de chiffres mobiles. L'axe des compte-tours, qui comportent un mécanisme des plus simples, est pourvu d'un pointeau en acier trempé et en forme de pyramide triangulaire. On pousse ce pointeau dans un trou ménagé dans l'extrémité de l'arbre de la machine. Les arêtes de la pyramide, en mordant dans les parois de la cavité, sont entraînées par l'arbre et communiquent la vitesse de celui-ci au compteur. Cependant, des glissements sont possibles; aussi, pour atteindre une exactitude rigoureuse, est-il bon d'attacher l'axe du compteur à l'axe mobile à l'aide d'un boudin métallique fixé de part et d'autre.

Pour se servir des compte-tours à pointeau, on pousse le pointeau contre l'arbre en même temps qu'on fait partir le compte-secondes et l'on retire le pointeau quand l'aiguille du compte-secondes marque une minute. Cette façon de procéder peut entraîner

une erreur par suite de l'inertie du compteur, qui fait perdre quelques révolutions au début ; il est vrai que la même cause amène une légère compensation lors du retrait. Une erreur d'une demi-seconde sur une minute produit une erreur relative voisine du centième. Lorsqu'on se sert de compteurs fixés à l'arbre, on fait partir l'aiguille du compte-secondes quand le compteur est au

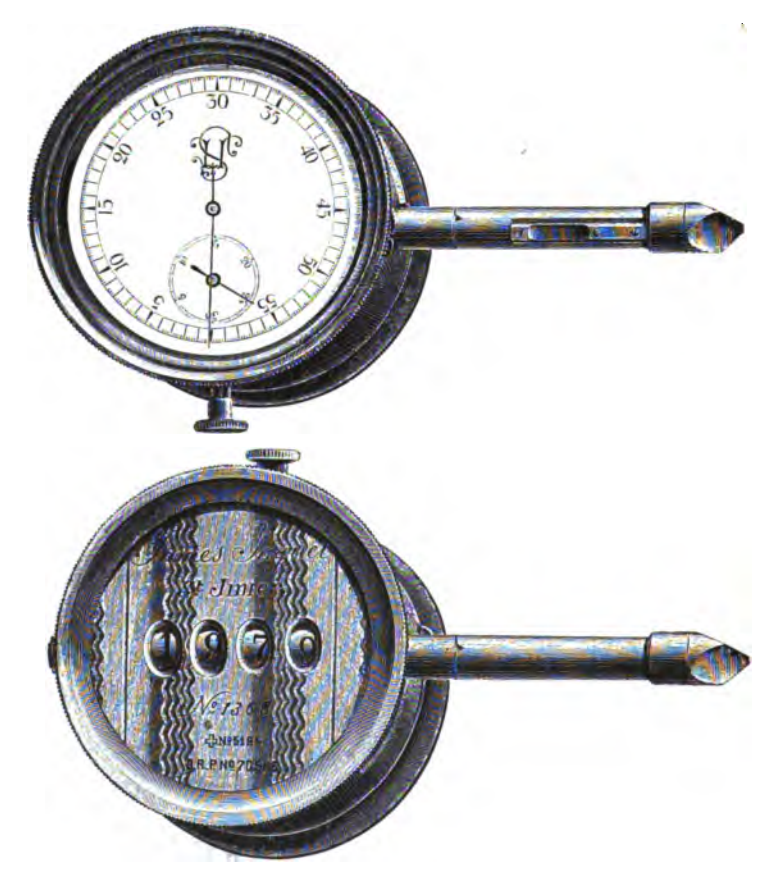


Fig. 11.

zéro, et on l'arrête quand celui-ci marque un nombre rond de centaines ou de milliers de tours. Avec ces appareils, on détermine souvent la vitesse moyenne en comptant les tours pendant plusieurs minutes.

Les compteurs à chiffres, employés avec les machines lentes, sont souvent à mouvement alternatif et commandés par une petite bielle, mue par l'arbre mobile.

Les compte-secondes employés dans ces expériences doivent être non-magnétiques, car les dynamos sont susceptibles d'aimanter les appareils qui ne sont pas dans ce cas et de causer ainsi des erreurs sérieuses dans la mesure du temps.

La fig. 11 montre les deux faces d'un appareil dû à M. Jaquet et renfermant un compte-tours et un compte-secondes. Ce dernier est déclanché au moment où l'on appuie le pointeau contre l'arbre mobile et s'arrête quand on retire l'instrument, ce qui assure la simultanéïté des deux lectures.

On fait quelquefois usage, pour rendre plus rapide la mesure des vitesses, *d'indicateurs de vitesse* ou *tachymètres*, dans lesquels les déplacements de l'index sont commandés par des mobiles qui s'écartent plus ou moins d'une position d'équilibre en vertu de la force centrifuge. Ces appareils doivent être étalonnés fréquemment à l'aide d'une des méthodes précédentes. Enfin, avec les machines lentes, on se contente parfois d'un essai grossier consistant à compter les tours pendant une ou plusieurs minutes. Le compte des chiffres se fait à partir de zéro et non de l'unité.

On peut être amené à déterminer les variations de vitesse d'une machine pendant une révolution. Le moyen le plus simple pour arriver à ce résultat consiste à coller, sur un volant fixé sur l'arbre mobile, une bande de papier recouvert de noir de fumée. Durant la révolution du volant, on approche de la jante noircie un style porté par un diapason. La sinusoïde tracée par le style sur le papier procure une division du temps en intervalles d'égale durée, qui permet d'estimer les variations de vitesse cherchées.

Dans certains cas, il est utile d'employer la *stroboscopie* pour la mesure des vitesses. On regarde la poulie dont on cherche la vitesse à travers les trous faits dans un disque mobile. Si la vitesse de celui-ci est égale à celle de la poulie, cette dernière paraît immobile. Mais si la vitesse de la poulie est plus faible, on voit passer successivement les rayons de la poulie comme si celle-ci tournait dans le même sens que le disque. Supposons que la poulie porte 20 divisions. Si, en 20 secondes, 4 divisions ont passé devant

les trous du disque, la vitesse de la poulie est inférieure de $\frac{1}{100}$ à celle du disque. Connaissant une fois pour toutes la vitesse de ce dernier, on pourra donc déterminer la vitesse cherchée par un calcul simple.

Essai d'une installation motrice à vapeur. — L'essai complet d'une installation motrice à vapeur comporte d'abord la détermination du poids de vapeur sèche produite par kilogramme de charbon consumé; c'est là la valeur de l'effet utile de la chaudière. Vient ensuite la mesure du poids de vapeur sèche consommée par cheval-heure indiqué aux cylindres de la machine à vapeur. Enfin, on doit estimer le rapport entre la puissance effective disponible sur l'arbre de la machine à vapeur et la puissance indiquée, rapport désigné sous le nom de rendement organique de la machine. On juge réellement de la valeur économique de celle-ci par la consommation de vapeur correspondant au cheval-heure effectif, mais, eu égard à la difficulté des mesures au frein, il est rare qu'on détermine le travail effectif autrement que par la différence entre le travail indiqué en charge et le travail indiqué à vide.

Essai de la chaudière. Il convient tout d'abord de préciser la qualité du combustible employé. L'indication la plus exacte est fournie par une mesure calorimétrique, faite aisément au moyen de la bombe calorimétrique et donnant le pouvoir calorifique. A défaut de cette mesure, on peut faire exécuter par un chimiste le dosage du charbon en carbone et en hydrogène et additionner les calories dégagées par la combustion de ces deux corps. Les prises d'essai du charbon doivent être prélevées sur le mélange pulvérisé de pelletées prises en divers endroits du tas servant à l'essai de la chaudière.

Quelquefois, on fait un essai de vaporisation en 2 ou 3 heures: on le commence en pesant le charbon enflammé existant sur la grille; on mesure le charbon au fur et à mesure du chargement, et l'on pèse enfin le charbon restant sur la grille à la fin de l'essai; on déduit les cendres du charbon consommé. Un tel essai laisse beaucoup d'incertitude.

Il est préférable de faire durer l'essai 8 à 10 heures en faisant en sorte que la grille soit chargée à peu près de la même manière

au commencement et à la fin de l'expérience. Les différences qui peuvent exister de ce chef ont alors fort peu d'influence sur l'évaluation de la quantité totale de combustible brûlé. Il faut s'assurer de l'étanchéité des joints en laissant la chaudière en charge pendant 12 à 24 heures et en vérifiant l'abaissement du niveau de l'eau, ce qui permet de déduire la perte horaire.

La manière de procéder suivante est recommandée par M. Kennedy. Après avoir vérifié tous les joints et, au besoin, remplacé les valves par des tôles pleines dans les branchements non utilisés des conduites, on fait mettre la chaudière à feu 2 heures avant l'essai, pour que toutes ses parties acquièrent leur température normale; 10 à 15 minutes avant de commencer les expériences de vaporisation, on fait arrêter le chargement, nettoyer les feux et vider le trou aux cendres; la pression tombe, la machine alimentée fonctionnant à sa charge normale. Quand la chute atteint 5 pour 100, on marque le niveau de l'eau dans les tubes indicateurs, on note la pression et l'on commence les relevés. A partir de ce moment, on charge du combustible qu'on pèse au fur et à mesure. On s'arrange de manière à tenir toujours prête et pesée la quantité de combustible brûlée en une demi-heure. On maintient la pression bien constante durant tout l'essai.

A la fin, on laisse de nouveau descendre la pression jusqu'à la valeur initiale, et l'on s'arrange de manière que le niveau de l'eau soit le même qu'au début. On arrête alors l'expérience.

On fait analyser un échantillon des cendres pour déterminer la quantité de combustible non consommé qu'elles contiennent encore.

Pour permettre d'évaluer l'eau vaporisée, la pompe alimentaire puise l'eau dans un bac jaugé pourvu d'un thermomètre. Le chauffeur doit maintenir le niveau de l'eau dans la chaudière aussi constant que possible pendant l'expérience ; avant de vérifier le niveau, il faut vider les tubes indicateurs afin d'établir l'équilibre des températures.

Il convient de mesurer l'eau de primage entraînée par la vapeur. Le moyen le plus commode consiste à ajouter 1 pour 1 000 de chlorure sodique à l'eau d'alimentation. Ce sel est entraîné par l'eau de primage. On recueille de temps en temps une petite quantité de vapeur par un orifice fait dans le tuyau qui conduit le fluide à la

machine et près de celle-ci. Cette vapeur est condensée dans un serpentin. On prélève des volumes égaux de cette eau de condensation et de l'eau alimentaire. On ajoute à ces deux prises d'essai du chromate de potassium, puis une solution de nitrate d'argent. Il se forme d'abord un précipité blanc de chlorure d'argent tant qu'il reste du chlorure sodique; à partir de ce moment, il se forme du chromate d'argent rouge. Les poids de la solution de nitrate d'argent à verser dans les deux prises d'essai pour amener la coloration rouge sont dans le rapport des quantités de sel marin contenues. On peut ainsi estimer l'eau de primage, qui, seule, a pu amener du sel marin dans la vapeur condensée. La densité des solutions de chromate de potassium et de nitrate d'argent ne joue aucun rôle.

Il convient d'être en garde contre certaines fraudes dans les essais de chaudières. Si, par exemple, le chauffeur laisse descendre fortement le niveau puis, à la fin de l'essai, alimente avec de l'eau froide, la quantité de chaleur contenue dans la chaudière est inférieure à ce qu'elle était au début.

De même, si, avant l'essai, le chauffeur ouvre brusquement la valve d'admission, les poches de vapeur se vident et le niveau descend. A la fin, on peut reformer les poches en fermant graduellement la valve, de manière à faire remonter le niveau.

Pour réduire le poids apparent de charbon brûlé, le chauffeur met les scories sur le côté de la grille pendant l'essai, puis les ramène sur le foyer à la fin en les faisant compter comme combustible.

Essai de la machine à vapeur. Le poids de vapeur sèche consommée par cheval-heure indiqué se déduit des expériences précédentes, des données fournies par les indicateurs et de la vitesse.

Dans le cas particulier où la machine est pourvue d'un condenseur par surface, le poids d'eau condensée, correction faite comme précédemment pour l'eau de primage, représente très exactement la vapeur consommée. On peut alors réduire à une ou deux heures la durée de l'essai de la machine à vapeur.

Mesure de la puissance mécanique. Indicateur Crosby. Dynamomètre de transmission von Heffner-Altenek. Frein à cordes. — La détermination du rendement d'une dynamo conduite

par un moteur à vapeur nécessite l'estimation du travail fourni par le moteur. Ce travail est égal à l'énergie mécanique développée par la vapeur dans les cylindres, diminuée des pertes dues aux frottements de la machine.

Pour estimer le travail de la vapeur, on se sert d'*indicateurs* qui permettent de déterminer la pression moyenne de la vapeur dans le cylindre. L'un des plus employés pour l'essai des machines à grande vitesse, utilisées fréquemment pour conduire les dynamos, est l'*indicateur Crosby*, fig. 12 et 13.



Fig. 12. Fig. 13.

On visse sur chacune des extrémités du cylindre à vapeur un petit cylindre contenant un piston sollicité vers le bas par un ressort taré, à double hélice. A une rotule portée par le ressort est adaptée une tige traversant librement le fond supérieur du cylindre et dont les déplacements sont amplifiés par une série de tringles articulées qui déplacent l'extrémité d'un style en laiton sur une feuille de papier préparé au blanc de zinc, enroulée autour d'un tambour. Ce dernier reçoit un mouvement alternatif lié avec celui du piston moteur, par l'intermédiaire d'une corde de chanvre attachée à un levier basculant mis en mouvement par la tige de ce piston. Les bras du levier sont proportionnés de manière que la course du piston corresponde à peu près à une révolution du tambour mobile. La corde reste toujours tendue grâce à un ressort de rappel,

à boudin, disposé à l'intérieur du tambour. Il faut que, dans sa position moyenne, le levier soit normal à la direction de la corde et que le plan dans lequel il oscille soit sensiblement tangent au tambour mobile, pour que les déplacements angulaires de celui-ci soient proportionnels aux chemins parcourus par le piston de la machine. Il convient que les cordes conduisant les indicateurs soient aussi courtes que possible.

Les tuyaux raccordant les indicateurs au cylindre du moteur doivent être gros et courts. Il n'est pas recommandable d'employer un seul indicateur pour les deux faces du piston moteur, sauf avec les machines dont la marche très lente laisse à l'équilibre des pressions le temps de s'établir.

On commence par tracer la ligne atmosphérique à la main. On s'assure que la course des traceurs est normale et l'on a soin de purger le cylindre de l'indicateur et la conduite de raccordement immédiatement avant de prendre les diagrammes. A cet effet, l'indicateur est pourvu d'un robinet à trois voies. On laisse le traceur parcourir son cycle une dizaine de fois, ce qui fournit une courbe moyenne.

Pour graduer l'indicateur, on l'adapte à une chaudière à vapeur où l'on fait varier la pression, celle-ci étant mesurée par un manomètre à air libre ou par des poids agissant sur le piston d'un cylindre de diamètre connu communiquant avec la même chaudière. Par ce moyen, on élimine l'effet des fuites éventuelles de l'indicateur et l'on porte celui-ci à sa température normale. A défaut d'une chaudière disposée pour ce tarage, on gradue les ressorts d'indicateur au moyen de poids connus dont on charge le centre du piston par l'intermédiaire d'une tige. A cet effet, l'appareil est maintenu, renversé, dans un étau de manière que l'axe de son cylindre à vapeur soit bien vertical. On a soin d'immerger, au préalable, le cylindre de l'indicateur dans l'eau bouillante, afin de donner au ressort une température qui ne soit pas trop éloignée de la température normale. On détermine, par ces procédés, les pressions correspondant aux ordonnées des courbes tracées sur le tambour enregistreur.

Les diagrammes fournis par les indicateurs fixés aux deux extrémités du cylindre moteur sont calculés par la méthode de Simpson

ou à l'aide du planimètre d'Amsler, en vue de déterminer la pression moyenne de la vapeur. Lorsqu'on fait usage du planimètre, on contourne deux fois chaque diagramme. Un moyen de calcul rapide, sans appareil, consiste à diviser la base du diagramme en dix parties égales et à ajouter les ordonnées correspondantes sur une bande de papier. La dixième partie de la longueur totale représente sensiblement l'ordonnée moyenne.

Connaissant, en outre, les dimensions du piston de la machine à vapeur, sa course et le nombre de tours effectués par seconde, on détermine aisément la puissance développée par la vapeur. On calcule une constante contenant toutes les données, sauf la pression moyenne et la vitesse, et qu'il suffit de multiplier par ces deux éléments pour avoir la puissance.

Il faut avoir soin de ne pas relever les diagrammes avant que l'indicateur ait atteint sa température normale. On veillera à ce que le style conserve, dans son support, la même position que pendant le tarage. Une déviation de la pointe peut altérer les ordonnées au point d'occasionner une erreur de plusieurs centièmes.

L'emploi des indicateurs expose à des erreurs qui, si elles s'accumulent, faussent notablement les résultats. Il est donc nécessaire de multiplier les essais en vue d'obtenir des moyennes. Il est bon de permuter les emplacements des indicateurs.

On inscrit sur les diagrammes relevés un numéro d'ordre et la date. Dans un tableau spécial, on note suivant des colonnes successives l'heure des essais, le numéro des diagrammes, le nombre de tours et, pour contrôle, la pression à l'entrée de la machine. On numérote, en commençant par 1, 101, 201, 301, 401, 501, les séries de diagrammes pris des deux côtés des cylindres à haute, moyenne et basse pressions.

Les *dynamomètres de transmission* permettent de mesurer directement l'effort transmis par une courroie à une machine électrique, en relevant la différence entre les tensions du brin conducteur et du brin conduit. Le modèle de M. von Heffner-Altenek est un des plus connus. Cet appareil se fixe entre le moteur et la dynamo ; il porte sept galets entre lesquels passe la courroie (fig. 14). Le galet du milieu peut seul se déplacer ; les autres ne servent qu'à guider les deux brins, afin qu'ils exercent sur la roue médiane des pres-

sions dirigées en sens opposés. Cette roue médiane pivote autour d'un axe qui se confond avec celui du petit galet de gauche ; elle est équilibrée par un contrepoids dont le support oscille devant une ligne de repère, et les mouvements du système sont amortis

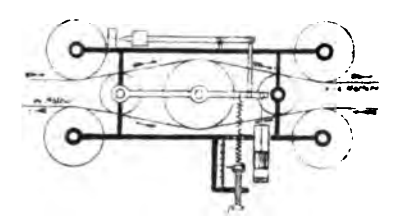


Fig. 14.

par une cataracte à air. Par suite de la tension prédominante du brin conducteur, situé à la partie inférieure dans la fig. 14, la roue mobile tend à être soulevée au dessus de sa position de symétrie, ce qu'indique l'index qui s'abaisse. Pour la ramener dans cette position, on agit sur un ressort, qui est gradué de manière à marquer directement sur l'échelle de ses allongements la différence des tensions des brins. Cette graduation s'obtient en fixant le dynamomètre verticalement et en suspendant aux deux brins de la courroie, qu'on empêche de glisser, une série de poids inégaux. Le déplacement à communiquer à l'extrémité du ressort pour amener l'index du contrepoids au repère est noté pour chaque valeur de la différence des tensions.

En même temps qu'on opère la mesure dynamométrique, on relève la vitesse angulaire de la dynamo à l'aide d'un compte-tours. En multipliant le nombre de tours par seconde par la circonférence moyenne d'enroulement de la courroie sur la poulie de la dynamo, on obtient la vitesse linéaire de la courroie. Le produit de cette vitesse par la différence des tensions des deux brins représente la puissance mécanique absorbée par la dynamo. Il y a, toutefois, des erreurs dues au glissement de la courroie sur la poulie de la dynamo et aux frottements des galets du dynanomètre, dont une partie influe sur la puissance mesurée.

Les frottements intérieurs d'une machine à vapeur sont représentés par la différence entre le travail indiqué et le travail dispo-

nible sur l'arbre moteur. Ce dernier s'estime à l'aide du *frein de Prony* qui transforme le travail utile en frottements mesurables. D'après les travaux de M. Thurston, confirmés par les expériences de M. Dwelshauvers-Dery, le travail mesuré au frein est sensiblement égal au travail indiqué en charge diminué du travail indiqué à vide. Le frein est également employé pour mesurer la puissance utile des moteurs électriques. Pour cette dernière application, on donne souvent aux freins la forme représentée par la fig. 15, qui a

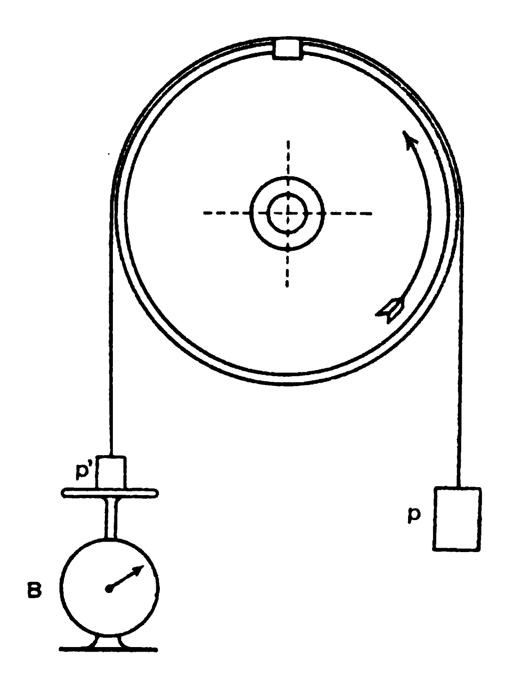


Fig. 15.

l'avantage de supprimer le réglage de l'équilibre, assez dificile à réaliser avec la forme primitive. Sur une poulie, fixée sur l'arbre mobile, on place une bande d'acier ou de toile, retenue par un cavalier. Cette bande est attachée, d'une part, à une balance dynamométrique B surmontée d'un poids p' et supporte, d'autre part, un poids p. Le sens de rotation est tel que ce dernier poids tende à

être soulevé. En appelant p'' l'effort indiqué par la balance, on peut écrire, lorsque l'équilibre existe entre le couple des frottements fr et le couple antagoniste $(p - p' - p'')\,d$,

$$fr = (p - p' - p'')\,d.$$

Si la bande est assez mince, on a sensiblement $r = d$.

En désignant par n le nombre de tours que la poulie effectue par seconde, relevé à l'aide d'un compte-tours, la puissance utile P est, en chevaux (les poids étant exprimés en kilogrammes et les longueurs en mètres),

$$\mathrm{P} = fr \times \frac{2\pi n}{75} = (p - p' - p'')\,d \times \frac{2\pi n}{75}.$$

En watts la puissance est

$$\mathrm{P}' = (p - p' - p'')\,d \times \frac{2\pi n}{75} \times 736.$$

La lubrification du frein, destinée à éviter un échauffement nuisible, est faite à l'aide d'eau savonneuse ou de graisse. Il convient que le frein soit bien équilibré avant la mise en place des poids dont on tient compte dans la formule précédente, c'est à dire que tout excédent de poids qui tendrait, au repos, à entrainer l'axe de la machine dans un sens ou dans l'autre soit compensé par un contrepoids convenable. Pour effectuer ce réglage, on fait reposer l'induit de la dynamo par son arbre sur deux règles horizontales pour lui donner une grande mobilité. Si la bande enroulée sur la poulie est de section uniforme et symétriquement disposée par rapport à la verticale passant par l'axe de la poulie, ce réglage est inutile.

Pour l'essai des petits moteurs, on modifie parfois le frein comme il est représenté dans la fig. 16. Une bande de toile ou une corde de chanvre, enroulée tout autour de la poulie afin d'équilibrer les efforts sur les coussinets, est fixée, d'une part, à une balance dynamométrique et supporte, à l'autre bout, un plateau qui est chargé de poids.

Avec des moteurs de 1 à 2 chevaux et des poulies de 20 à 30 cm, une lubrification de la corde par quelques gouttes d'huile suffit.

Avec des puissances plus élevées, on peut refroidir la poulie en

adoptant la forme indiquée dans la fig. 17. Un jet d'eau est projeté dans une gorge intérieure de la poulie. L'eau se maintient dans

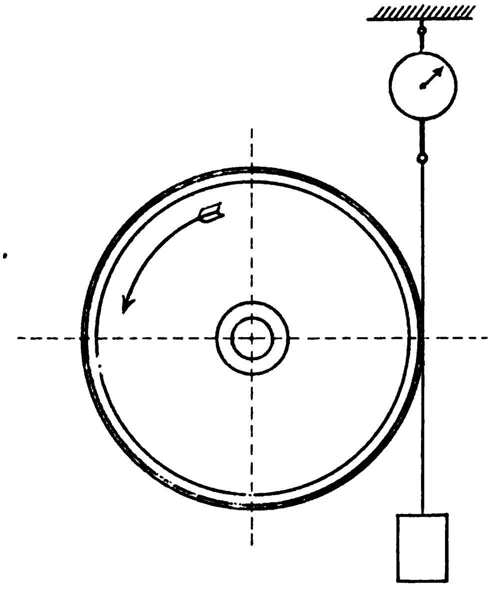


Fig. 16.

cette gorge par la force centrifuge. La circulation du liquide est assurée par le tuyau T.

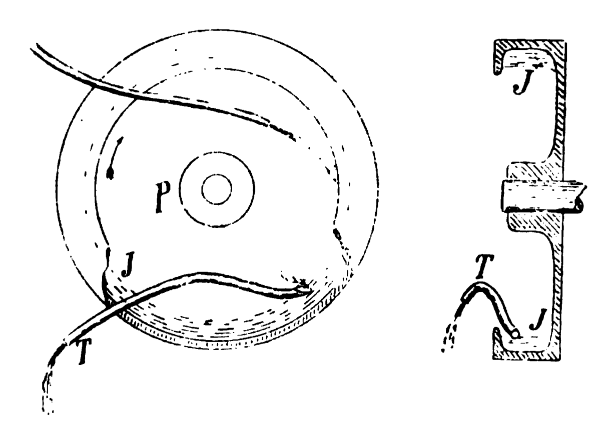


Fig. 17.

Lorsque la lubrification se fait à l'eau, il faut que la surface frottante S de la poulie, exprimée en mètres carrés, soit liée à la puissance absorbée P, exprimée en chevaux, par la formule

$$S = \frac{P}{500}.$$

Dans le cas où il n'y a pas de lubrifiant, la relation devient

$$S = \frac{P}{70}.$$

On verra plus loin que les générateurs électriques peuvent être employés comme freins. Le plus simple est le disque de Foucault.

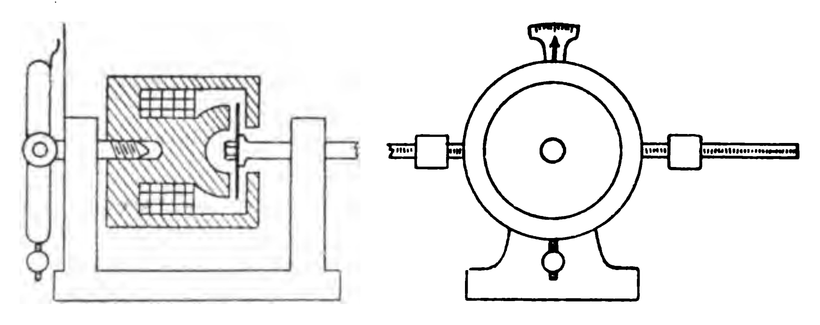


Fig. 18.

La fig. 18 montre le dispositif de M. Pasqualini, dans lequel un disque en cuivre tourne devant les pôles d'un inducteur monté sur un axe mobile. L'extrémité de ce dernier soutient un volant de grand moment d'inertie dont la position est repérée sur une graduation et qui porte deux règles horizontales, le long desquelles on peut déplacer des poids qui permettent de varier et d'estimer le couple résistant. On évalue la puissance absorbée par le palier du disque en mesurant l'énergie électrique consommée par le moteur tournant avec et sans disque.

Chapitre III.

MESURES PHOTOMÉTRIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Grandeurs considérées en photométrie. — Un foyer lumineux, supposé réduit à un point, émet des rayons dans toutes les directions. Ces rayons peuvent être comparés aux lignes de force qui, dans la théorie des forces centrales, émergent des centres agissants. Par analogie, on dira que le flux de lumière reste constant dans un cône divergent émanant de la source.

L'*intensité lumineuse* du foyer peut être définie, comme l'intensité d'un pôle magnétique, par le rapport du flux lumineux à l'angle solide qui l'enserre. Si l'on appelle Φ le flux lumineux total issu d'un foyer punctiforme et distribué uniformément dans l'espace environnant, et I l'intensité du foyer, on a

$$I = \frac{\Phi}{4\pi};$$

d'où $\Phi = 4\pi I$, expression analogue à celle du théorème de Gauss.

Si le foyer lumineux éclaire inégalement dans les diverses directions, on peut définir l'intensité lumineuse de la source dans une

direction donnée par le rapport du flux $d\Phi$ qu'elle émet dans un angle solide élémentaire, ayant pour axe cette direction, à la valeur $d\omega$ de cet angle solide

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

Inversement, le *flux lumineux* émis par une source punctiforme dans une direction déterminée, à travers un angle solide élémentaire, est le produit de la valeur de cet angle par l'intensité lumineuse dans la direction considérée.

Le flux total qui traverse une surface quelconque est donné par l'expression

$$\Phi = \int I\, d\omega,$$

l'intégration étant étendue à toute la surface. Si le foyer rayonne également dans toutes les directions, on peut écrire

$$\Phi = I \int d\omega.$$

Cette expression peut encore être mise sous une autre forme. En appelant $d\sigma$ un élément de la surface frappée par le flux, r sa distance à la source et α l'angle d'incidence, on a

$$\Phi = I \int \frac{d\sigma \cos\alpha}{r^2}.$$

On appelle *éclairement* en un point d'une surface frappée par le flux lumineux, le rapport du flux qui tombe sur un élément de la surface en ce point à l'aire de cet élément :

$$e = \frac{d\Phi}{d\sigma}.$$

Dans le cas d'une source punctiforme rayonnant uniformément un flux Φ, l'éclairement en chaque point d'une sphère de rayon R, ayant son centre au foyer, est

$$e = \frac{\Phi}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2},$$

I désignant l'intensité de la source.

L'éclairement d'un élément de surface oblique, frappé par le flux sous un angle d'incidence α, est

$$e' = \frac{d\Phi}{d\sigma} = \frac{I\cos\alpha}{R^2}.$$

Les sources lumineuses usuelles ne sont pas punctiformes et l'on définit sous le nom d'*éclat* d'un foyer, le rapport de l'intensité mesurée normalement au foyer à la surface d'émission de celui-ci.

Ainsi, en désignant par I l'intensité normale d'une surface lumineuse s, l'éclat de cette dernière est

$$\varepsilon = \frac{I}{s}.$$

Si l'on considère une paroi lumineuse sous une direction oblique, le flux de lumière reçu par l'œil est moindre que si le rayon visuel était normal à la paroi, puisque la surface d'émission apparente est plus petite. Le flux émis par unité de surface d'une paroi dans une direction faisant un angle β avec la normale est

$$\varepsilon \cos\beta.$$

C'est pourquoi un globe lumineux paraît uniformément éclairé, le flux de lumière émis vers l'œil de l'observateur par chaque élément du globe étant le même que celui qu'émettrait la projection de l'élément normale au rayon visuel.

Ces considérations montrent qu'il est nécessaire, lorsqu'on compare deux plages lumineuses, de les examiner sous la même inclinaison.

Au point de vue subjectif, il n'existe aucune différence essentielle entre la notion d'éclat et celle d'éclairement. Par rapport à l'œil l'éclairement d'une surface est l'éclat de celle-ci devenue lumineuse par réflexion ou par transparence.

Voici deux autres notions, d'un usage moins fréquent que les précédentes, qui ont été définies par M. Blondel.

L'*illumination* ou, pour éviter la confusion avec une autre quantité désignée en Angleterre sous le même nom, la *lumination*

d'un objet est le produit de l'éclairement auquel il est soumis par la durée de cet éclairement,

$$j = et.$$

Cette notion est essentielle en photographie ; elle intervient également dans les phénomènes de la vision, parce que l'œil doit être soumis à une certaine lumination minima pour éprouver la sensation lumineuse.

La ***quantité de lumière*** ou ***éclairage*** est le produit du flux lumineux qui frappe un objet par la durée de l'éclairement,

$$Q = \Phi t.$$

Cette quantité doit constituer la base rationnelle des marchés relatifs à l'éclairage. C'est la quantité de lumière fournie par un foyer en un temps donné qu'on paie et non l'intensité lumineuse qui n'en est qu'un facteur.

Étalons de lumière. — Les étalons d'intensité lumineuse sont nombreux : c'est dire qu'aucun d'eux ne possède les qualités nécessaires pour justifier son emploi exclusif.

En France, on a adopté, comme étalon d'intensité, la lumière émise horizontalement par la *lampe Carcel* employée avec les précautions minutieuses indiquées par Dumas et Regnault. Voici les données réglementaires :

Diamètre intérieur du tube porte-mèche	23,5	mm.
» » » courant d'air	17,0	»
Hauteur de la cheminée.	290,0	»
Diamètre intérieur de la cheminée au sommet . .	34,0	»
» » » » à la base . . .	47,0	»
Hauteur de la cheminée jusqu'au coude	61,0	»
Épaisseur du verre.	2,0	»
Saillie de la mèche.	10,0	»
Distance verticale de la mèche au coude du verre .	7,0	»

La mèche est une tresse de 75 brins et pèse 3,6 gr. par dm.

La lampe doit brûler avec une hauteur de flamme d'environ 40 mm et consommer 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure. La mèche doit être allumée en 4 points à la fois, afin de ne pas donner une flamme irrégulière. Le poids d'huile consommée, qui constitue le critérium de l'étalon, est estimé à l'aide

d'une balance spéciale sur laquelle la lampe est placée pendant les mesures. Le poids d'huile brûlée est contrôlé de 5 en 5 minutes. Lorsque la consommation varie de moins de 4 grammes au voisinage de 42 grammes, on admet que l'intensité de l'étalon suit une progression correspondante.

En Angleterre et aux États-Unis, on s'est servi d'un étalon moins précis, mais plus commode : la bougie de blanc de baleine (*standard candle*), de 6 à la livre anglaise. Cette bougie donne son intensité normale horizontalement lorsqu'elle brûle avec une hauteur de flamme de 43 à 45 mm. On utilise maintenant l'étalon à gaz de penthane de M. Vernon Harcourt, qui vaut sensiblemen 10 candles.

Les Allemands ont employé la bougie de paraffine (*Vereinskerze*), de 12 au kilogramme, dont la flamme mesure environ 50 mm de hauteur. Ils se servent actuellement d'une petite lampe à mèche,

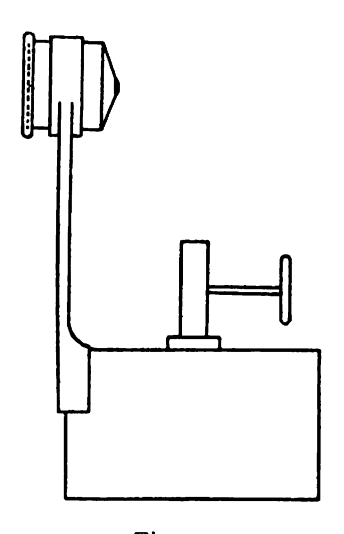


Fig. 19.

étudiée par *M. von Heffner*, et brûlant de l'acétate d'amyle (fig. 19). La mèche est constituée par un faisceau de brins de coton sortant d'un tube en maillechort ayant 8 mm de diamètre intérieur, 8,3 mm de diamètre extérieur et 25 mm de saillie. La flamme, utilisée après 10 minutes d'allumage au moins, doit avoir

40 mm du bord du tube au sommet. La hauteur s'apprécie à l'aide d'une lentille située à égale distance de la flamme et d'un verre dépoli portant une graduation verticale. L'image de la flamme s'inscrit sur la graduation. Si la hauteur h dépasse 40 mm, on a, pour l'intensité horizontale,

$$I = 1 + 0{,}025\,(h - 40);$$

pour une hauteur inférieure,

$$I = 1 - 0{,}03\,(40 - h).$$

Il importe d'adopter l'épaisseur indiquée pour le tube à mèche, l'intensité lumineuse étant diminuée par refroidissement si le tube est trop épais et, inversement, accrue si le tube est trop mince.

Cet étalon, comme tous ceux à flamme, doit brûler dans un air pur et calme. Les impuretés de l'air diminuent la combustion et affaiblissent l'intensité lumineuse.

M. Violle a préconisé un étalon défini plus rigoureusement que les précédents. Dans ceux-ci la température du foyer n'est pas stipulée. *L'étalon Violle* est constitué par la lumière émise normalement par un centimètre carré de platine à la température de la solidification (1775° C). Pour réaliser cet étalon, on fond environ 1 kilogramme de platine dans un creuset de chaux, à l'aide de la flamme oxhydrique, puis on laisse refroidir. Pendant la solidification du métal, qui dure quelques minutes, on observe la lumière rayonnée par la surface du bain, à travers un diaphragme percé d'un orifice de 1 cm².

On remarquera que les lampes étalons fournissent leur intensité normale, prise pour unité, suivant l'horizontale, tandis que l'étalon Violle doit être mesuré suivant une direction verticale. On emploie un réflecteur à 45° pour la comparaison avec les lampes, en tenant compte de son coefficient d'absorption.

L'étalon Violle, qui a été adopté en principe par le Congrès des Électriciens de 1881, est coûteux; de plus, l'expérience a montré qu'il se forme parfois à la surface du platine une pellicule dont le pouvoir émissif diffère de celui du métal fondu.

Comme étalon secondaire, le Congrès des Électriciens de 1889 a recommandé la *bougie décimale*, valant 1/20 de l'étalon Violle

et ainsi dénommée parce qu'elle représente un peu plus du dixième de la carcel. Elle équivaut au dixième d'une carcel brûlant 43,7 grammes d'huile à l'heure.

Il est commode de se servir, pour la comparaison des lampes électriques, d'une lampe à incandescence étalonnée au préalable. Les lampes à incandescence ont l'avantage de permettre une variation de l'éclairement de l'écran photométrique sans déplacement ; il suffit de modifier l'intensité du courant. La maison Siemens et Halske fabrique des lampes à filament droit disposé suivant l'axe d'un tube en verre bien régulier et qui rayonne également dans les plans passant par cet axe.

Voici quelques indications sur les valeurs relatives des principaux étalons. Suivant MM. Violle et Laporte, 1 carcel vaut :

0,48 étalon Violle,
9,6 bougies décimales,
8,91 candles,
9,1 kerzen,
10,9 étalons Hefner.

Il existe toutefois des différences sensibles entre les chiffres trouvés par divers auteurs pour ces rapports. Ces différences tiennent à la variabilité de certains étalons (les bougies de même marque peuvent présenter entre elles des différences de plusieurs pour cent) et à l'imperfection des méthodes de mesure.

Système d'unités pratiques. — M. Blondel a proposé un système d'unités pratiques pour la mesure des grandeurs photométriques précédemment définies. Ce système a été admis après quelques modifications par le Congrès de Genève de 1896.

L'unité fondamentale choisie est la ***bougie décimale***, qui, d'après les expériences de M. Laporte, représente 1,13 hefner ; d'où 1 hefner = 0,88 bougie décimale.

L'unité pratique de flux lumineux est le ***lumen*** ; c'est le flux produit par une bougie décimale dans un angle solide égal à l'unité. Partant, un foyer punctiforme de 1 bougie décimale rayonne uniformément un flux total de 4π lumens.

L'unité pratique d'éclairement, déjà proposée par M. Preece en 1889, est le ***lux***, représenté par l'éclairement que fournit une bougie

décimale sur une surface normale aux rayons et placée à 1 m de distance. Cette unité était appelée auparavant *bougie décimale à un mètre*.

L'éclat d'un foyer étant une grandeur mesurée assez rarement, on a donné à son unité pratique un nom composé, *bougie décimale par cm²*, qui rappelle sa définition, l'éclat d'un foyer étant, en effet, le rapport de l'intensité lumineuse à la surface d'émission normale aux rayons.

Enfin, l'unité pratique d'éclairage ou de quantité de lumière s'exprime par le mot composé *lumen-heure*, qui implique sa définition. Cette unité peut servir de base aux contrats d'éclairage.

Le tableau suivant résume les équations de définition et les noms des unités pratiques adoptées par le Congrès de Genève.

GRANDEURS	ÉQUATIONS DE DÉFINITION	NOMS DES UNITÉS PRATIQUES
Intensité lumineuse	I	bougie décimale.
Flux lumineux	$\Phi = I\omega$	lumen.
Eclairement	$e = \frac{\Phi}{s}$	lux.
Eclat	$i = \frac{I}{s}$	bougie décimale par cm².
Eclairage	$Q = \Phi t$	lumen-heure.

Bases de la photométrie. — La lumière, en tant que phénomène essentiellement subjectif, ne peut se mesurer que par son impression sur la rétine. Les effets calorifiques ou chimiques des rayons lumineux permettent de déterminer l'énergie relative de ces rayons, mais non leur aptitude à l'éclairement qui constitue le but des sources lumineuses.

La photométrie a pour objet la détermination de l'intensité lumineuse d'un foyer, en fonction de celle d'un autre foyer pris comme étalon. L'œil juge très mal du rapport de deux éclats ou de deux éclairements. D'après la loi psychophysique de Fechner . l'intensité de la sensation croit, non pas proportionnellement à l'excitation, mais au logarithme de celle-ci. Il en résulte qu'on ne peut arriver à quelque exactitude dans les mesures qu'en ramenant l'opération à la constatation de l'égalité de deux éclairements. Le

plus souvent, on éclaire deux écrans semblables, sous des incidences égales, par les deux sources à comparer et l'on modifie les distances de celles-ci aux écrans jusqu'à ce que les éclairements obtenus, considérés sous des angles égaux, paraissent identiques.

En vertu des relations précédentes, on a, en appelant I et I' les intensités lumineuses, et R et R' les distances,

$$\frac{I}{R^2} = \frac{I'}{R'^2}.$$

Le rapport des intensités est donc égal au rapport des carrés des distances correspondantes.

Comme, en général, les distances des sources lumineuses aux écrans sont grandes relativement aux dimensions des foyers, on peut considérer les sources comme punctiformes, sauf lorsqu'elles sont entourées de globes lumineux de grande surface. On peut cependant négliger l'erreur résultant de la simple application de la loi des carrés si la distance est au moins égale à dix fois la plus grande dimension du globe. M. Broca a montré qu'on juge le mieux de l'égalité de deux éclairements lorsque ceux-ci sont voisins de 10 lux, l'œil de l'observateur étant à environ 30 cm des écrans observés. Cette remarque renseigne sur la distance à laquelle il faut placer l'étalon du photomètre, pour que celui-ci fournisse les résultats les plus précis. L'éclairement des écrans devrait être spécifié avec les résultats des observations photométriques pour permettre d'apprécier les conditions dans lesquelles celles-ci ont eu lieu.

Il faut tenir compte dans les mesures photométriques de ce fait que les deux yeux ne subissent généralement pas à des degrés égaux les impressions lumineuses. Si l'on éclaire également les deux moitiés d'un écran translucide par des foyers identiques séparés par une cloison et situés à la même distance de l'écran, et si l'on regarde chaque moitié avec un œil, ce qui peut se faire en prolongeant en avant de l'écran la cloison découpée suivant le profil de la figure, les yeux jugent en général que les deux moitiés sont inégalement éclairées. Pour éprouver avec les deux yeux la même impression lumineuse, il est nécessaire de reculer l'un des foyers jusqu'à réduire, souvent de plus de $^1/_{10}$, l'éclairement correspon-

dant. Il s'ensuit qu'il est indispensable dans les mesures de placer les deux yeux de manière qu'ils voient à la fois les deux plages éclairées et que les rayons leur arrivent de ces plages sous des inclinaisons égales. Si ces conditions ne sont pas réalisables, il faut ne se servir que d'un œil pour l'observation, bien que la sensibilité soit alors notablement diminuée. Si les inclinaisons sont très peu différentes, on peut corriger l'erreur commise de ce chef, en intervertissant les positions des foyers et en prenant des moyennes, ou mieux encore, en se servant d'une source lumineuse auxiliaire qu'on compare successivement à l'étalon et au foyer inconnu, suivant le principe de la double pesée.

Lorsque les yeux fixent pendant quelque temps des plages éclairées, ils éprouvent une fatigue qui diminue leur sensibilité. Pour que l'œil saisisse le mieux possible le moment où les éclairements des deux plages sont égaux, il faut déplacer rapidement l'un des foyers comparés et déterminer les positions limites pour lesquelles l'œil perçoit une différence dans les éclairements. On adopte la position moyenne dans le calcul des intensités.

En prenant toutes les précautions indiquées, à savoir : éclairement des écrans d'environ 10 lux, vision binoculaire ou monoculaire des plages sous des incidences égales, distance de 30 cm entre les yeux et les plages éclairées, à moins qu'on ne se serve de lunettes de visée, déplacement d'un des foyers de manière à laisser aux yeux toute leur sensibilité, il n'est pas rare d'observer des différences de 0,7 à 1 pour 100 entre les résultats de divers observateurs, ce qui montre qu'en photométrie l'erreur personnelle a une influence plus grande que dans les mesures électriques. La photométrie tient, en effet, plus de la physiologie que de la physique, les phénomènes compliqués d'adaptation de l'œil faisant de celui-ci un instrument de mesure imparfait.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que les deux foyers comparés sont de même nature, c'est à dire de même teinte ou de même composition spectrale. Théoriquement la comparaison des éclairements n'est possible que dans ces conditions. S'il n'en est pas ainsi et si l'un des foyers est, par exemple, plus riche en rayons rouges, l'autre en rayons bleus, les éclairements ne sont

plus comparables et la mesure devient une affaire d'appréciation personnelle, où les phénomènes de daltonisme conduisent à des résultats très inégaux suivant les observateurs, les yeux des diverses personnes étant différemment impressionnés par les couleurs.

De plus, la loi des distances ne s'applique pas rigoureusement à des foyers inégalement colorés. Ce fait, découvert par Purkinje, peut se démontrer de la manière suivante. Deux lampes à incandescence semblables éclairent deux écrans, l'une à travers un verre rouge, l'autre à travers un verre vert. On règle les distances des lampes de manière que les éclairements paraissent égaux. Si l'on réduit ou si l'on augmente les intensités des foyers dans la même proportion, en affaiblissant ou en accroissant le courant qui traverse les lampes, les deux éclairements sont jugés inégaux.

Comme le cas de la comparaison des foyers de teintes différentes, arc voltaïque et Carcel par exemple, se présente constamment dans la pratique, il est nécessaire de recourir à divers artifices pour éviter de trop grandes inexactitudes dans les mesures. Le moyen le plus rigoureux consiste à décomposer les faisceaux émis par les foyers à l'aide du prisme et à comparer séparément les rayons de même couleur, pris deux à deux; mais cette opération, qui fait l'objet de la spectrophotométrie, n'est pas appliquée par les praticiens à cause de sa complexité.

MM. Nichols et Crova ont remarqué que l'égalité des éclairements moyens fournis par des foyers hétérogènes, correspond à l'égalité des éclairements réalisés par des rayons d'une longueur d'onde déterminée. M. Nichols a indiqué la longueur d'onde $\lambda = 600$ microns. M. Crova a trouvé que cette longueur d'onde critique est $\lambda = 582$ microns. M. Crova a, en outre, indiqué un procédé propre à obtenir ces rayons à l'exclusion des autres. Il suffit d'interposer, entre l'œil et l'écran éclairé, une cuve en verre contenant une épaisseur de 5 mm d'une solution de 22,3 gr. de perchlorure de fer et de 27,2 gr. de chlorure de nickel cristallisé, dissous dans l'eau distillée de manière à former un volume de 100 cm³ à 15° C. La solution est saturée de chlore pour assurer la conservation du liquide. Ce procédé supprime la nécessité de photométrer séparément les divers rayons du spectre et permet

de déterminer directement le rapport des intensités lumineuses de deux sources de teintes différentes. Néanmoins, il a encore été trouvé trop complexe par les praticiens. Plus simplement, on peut utiliser un verre vert ne laissant passer que les rayons de longueur d'onde 582.

Le moyen le plus communément employé consiste à faire exécuter plusieurs mesures par des observateurs différents et à prendre des moyennes. On a soin de déplacer brusquement l'un des foyers entre des positions limites qu'on resserre de plus en plus, car l'œil perçoit plus nettement l'égalité d'éclairement lorsque les variations sont rapides que lorsqu'elles s'accomplissent lentement.

Enfin, si les teintes des lumières sont par trop différentes, on peut recourir aux artifices suivants.

On observe les écrans en clignant des yeux. Ce procédé, très employé par les peintres pour différencier les valeurs des éclairements, a pour effet de réduire la quantité de lumière qui entre dans l'œil et, par suite, d'éliminer la sensation colorée qui exige un certain degré d'excitation de la rétine.

Un autre moyen consiste à tracer sur les écrans éclairés par les deux sources une série de dessins décroissants et à faire varier la distance des foyers jusqu'à ce que le dessin le plus petit qu'on puisse percevoir ait la même grandeur sur les deux écrans. L'approximation obtenue par ce procédé dépend du nombre de dessins décroissants, ainsi que de l'acuité visuelle de l'observateur.

Méthodes photométriques. — La plupart des photomètres usuels sont basés sur la loi des distances. Les deux moitiés d'un écran sont éclairées, par réflexion ou par transparence, sous des incidences égales par les deux sources à comparer. On déplace celles-ci jusqu'à ce que les éclairements qu'elles produisent soient égaux et l'on applique la formule

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}. \qquad (1)$$

La mesure doit se faire dans une chambre à parois d'un noir mat, afin d'éviter les reflets sur l'écran. Le cube de la chambre doit être assez grand, parce que les étalons à flamme sont altérés par

l'air vicié. Il faut que, pendant les mesures, les sources ne puissent pas être vues directement par l'observateur. Celui-ci fait, à cet effet, usage d'une grande visière noire, recourbée sur les côtés et ne donnant accès qu'aux rayons issus de l'écran.

Lorsque les foyers à comparer sont très inégaux, on peut reculer l'un d'eux à une grande distance de l'écran, mais ce système n'est pas sans inconvénient, car il exige des couloirs photométriques étendus et les poussières flottant dans l'atmosphère du laboratoire absorbent une notable fraction du faisceau lumineux. On peut aussi rapprocher la lampe étalon de l'écran, mais il est à craindre que l'éclairement de ce dernier cesse d'être uniforme ou dépasse trop l'éclairement de 10 lux avec lequel la comparaison atteint la plus grande précision.

On tourne ces difficultés en employant une source lumineuse d'intensité intermédiaire, qu'on compare aux lampes étudiées. Comme étalons intermédiaires, on utilise de fortes lampes à incandescence.

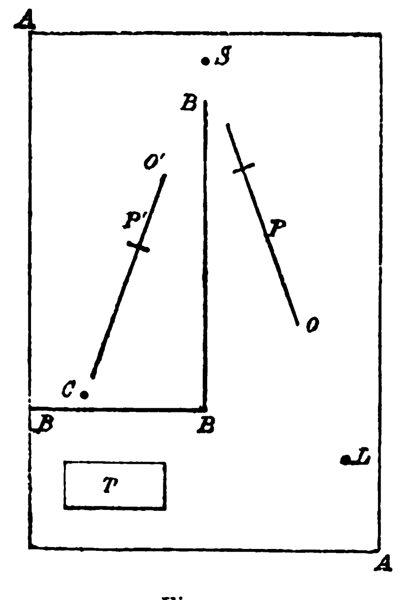


Fig. 20.

La fig. 20 montre le plan d'une chambre noire A A, dans laquelle deux bancs photométriques P et P' sont séparés par une

cloison B. Les lumières à comparer sont disposées en L et en C, tandis que la source intermédiaire est placée en S. On peut ne se servir que d'un seul banc en comparant successivement l'étalon et la lampe inconnue à la source auxiliaire, ce qui élimine certaines erreurs comme on l'a vu au paragraphe précédent.

Une autre méthode, préconisée par MM. Ayrton et Perry, consiste à interposer, sur le faisceau émis par le foyer le plus intense, un diaphragme dans lequel se trouve une lentille divergente biconcave.

Si le foyer est à une distance l de la lentille, la divergence des rayons qui frappent l'écran est accrue comme si la source était au foyer conjugué et écartée de la lentille d'une distance l', telle que

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \qquad (2)$$

f étant la distance focale principale de la lentille.

Par suite,

$$l' = \frac{lf}{l+f}$$

Désignons par ρ le rayon du cercle éclairé sur l'écran lorsque le faisceau traverse le diaphragme sans lentille, et par ρ' le rayon du cercle agrandi par l'interposition de la lentille dans le diaphragme.

Le rayon de celui-ci étant r et sa distance à l'écran δ, on a

$$\frac{\rho}{r} = \frac{l+\delta}{l},$$

$$\frac{\rho'}{r} = \frac{l'+\delta}{l'};$$

d'où

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{l(l'+\delta)}{l'(l+\delta)}$$

et, en remplaçant l' par sa valeur,

$$\frac{\rho'}{\rho} = 1 + \frac{\delta l}{f(l+\delta)}.$$

Or, les éclairements produits sans et avec interposition de la lentille sont dans le rapport

$$\left(\frac{\rho'}{\rho}\right)^2 = \left[1 + \frac{\delta l}{f(l+\delta)}\right]^2.$$

Il faut donc, dans l'expression de la loi des distances, introduire, au lieu de la distance

$$d = l + \delta,$$

la distance virtuelle

$$d_1 = \frac{\rho'}{\rho}(l + \delta) = l + \delta + \frac{\delta l}{f};$$

mais, comme

$$l = d - \delta,$$

$$d_1 = d + \frac{\delta(d - \delta)}{f}.$$

La formule (1) devient alors

$$\frac{I}{I'} = \frac{\left[d + \frac{\delta(d - \delta)}{f}\right]^2}{d'^2}. \quad (3)$$

La lentille exerce son plus grand effet quand $\delta = \frac{1}{2} d$.

Pour déterminer la distance focale f, on emploie deux sources identiques, telles que deux lampes à incandescence. On dispose la première lampe à la division o du banc photométrique, l'écran à la division d et la seconde lampe à la division $2d$ qui donne l'égalité des éclairements. On introduit ensuite la lentille à la division $\frac{d}{2}$; il faut alors écarter la lampe mobile à une distance d' de l'écran pour revenir à l'égalité. En appliquant la formule (3), il vient

$$f = \frac{d^2}{4(d' - d)}.$$

Il est à remarquer que, dans ces formules, on a négligé les réflexions à la surface de la lentille, qui dépassent souvent 5 pour 100 de la lumière incidente. Pour compenser cette perte, on place symétriquement de l'autre côté du photomètre une simple plaque de verre qui amène une perte sensiblement égale.

Degré d'incandescence. — Quand on veut spécifier la qualité de la lumière fournie par les sources lumineuses, on adopte la définition suivante, proposée par M. Crova et acceptée par le Congrès des Électriciens de 1889. Le *degré d'incandescence* d'un foyer est le quotient des intensités des radiations de longueurs d'onde $\lambda = 582$ (vert) et $\lambda = 657$ (rouge). Pour déterminer ce

rapport, la lampe est comparée à un étalon déterminé et l'on place devant l'œil une cuve remplie, sous une épaisseur de 5 mm, de la solution de chlorures de nickel et de fer déjà mentionnée : soit a l'intensité de la lampe dans ces conditions. La même mesure est répétée après avoir placé devant l'œil un verre rouge qui laisse passer les rayons de longueur d'onde $\lambda = 657$: soit b l'intensité de la lampe dans ces nouvelles conditions. Le rapport $\frac{a}{b}$ est le degré d'incandescence.

Photomètre Foucault. — Cet appareil comporte un écran en verre laiteux ou dépoli E, derrière lequel se placent les deux foyers à comparer A et B, séparés par une cloison C normale à l'écran et divisant l'angle BEA en parties égales ; la cloison est légèrement écartée de l'écran, de manière que les plages lumineuses correspondant aux deux sources soient limitées par une mince ligne d'ombre projetée par la cloison. On déplace l'un des foyers suivant

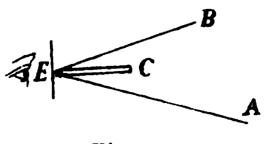


Fig. 21.

la direction du rayon incident, jusqu'à ce que les éclairements des deux moitiés de l'écran paraissent égaux pour l'œil placé, suivant la ligne E C, à 30 cm de l'écran. On a soin d'observer les diverses précautions indiquées précédemment, pour réduire l'erreur d'observation au minimum. Il suffit alors d'appliquer la loi des distances aux deux sources de lumière.

Photomètre Lambert et Rumford. — Dans le photomètre Lambert et Rumford, les deux foyers à comparer sont placés du même

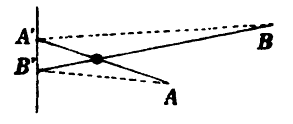


Fig. 22.

côté d'un écran blanc opaque, sur lequel une tige porte deux ombres A' et B', éclairées chacune par le foyer situé du même côté.

On a soin de rendre égales les incidences des deux rayons A A′ et BB′, ce qui est facile si la tige est assez rapprochée de l'écran pour que les deux ombres se touchent. On écarte l'un des foyers jusqu'à ce que les ombres paraissent également éclairées et l'on applique la loi fondamentale aux distances A′ B et A B′.

Photomètre Villarceau. — Sur une droite passant par les deux foyers à comparer, on dispose un écran présentant deux faces blanches à angle droit, qui réfléchissent les faisceaux incidents vers l'observateur. Le réglage des distances a pour but d'égaliser les

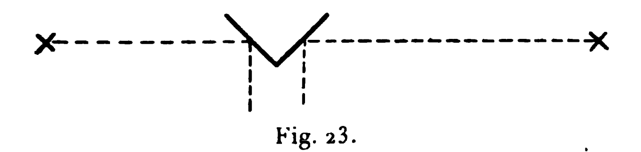


Fig. 23.

éclairements des deux faces. Ce photomètre, qui a été repris par MM. S. Thompson et Starling, peut, pour des mesures grossières, se réduire à une carte de visite pliée et tournée de manière que le plan bissecteur soit normal à la ligne des foyers.

Photomètre Bunsen. — Le photomètre Bunsen repose sur cette observation qu'une tache d'huile faite sur une feuille de papier paraît brillante si le papier est éclairé par transparence, et sombre

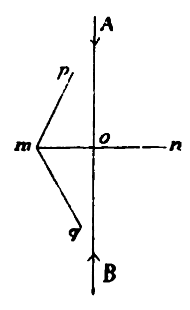


Fig. 24.

si le papier est éclairé par réflexion. Si la feuille reçoit des quantités de lumière égales sur les deux faces, la tache se confond avec le papier.

Si l'on dispose les deux foyers à comparer en A et B (fig. 24), la tache O semble disparaître lorsque les intensités lumineuses satisfont à la loi des distances. Pour observer simultanément les deux faces de l'écran, on fait usage de miroirs plans *mp* et *mq* qui réfléchissent ces faces vers le spectateur. La disparition de la tache tient à ce que la somme des flux lumineux que le papier émet par transparence et par réflexion est égale au flux total correspondant que fournit la tache. Comme les coefficients de réflexion des deux faces de l'écran ne sont jamais identiques, la disparition de la maculature n'a pas lieu des deux côtés à la fois. On détermine par tàtonnements la position pour laquelle la tache a la même apparence sur les deux faces du papier et l'on applique la loi des distances à cette position. Si l'on veut une exactitude plus grande, on retourne l'écran pour recommencer l'opération et l'on prend la moyenne des résultats obtenus dans les deux mesures. Le photomètre et les foyers comparés se placent sur un banc photométrique divisé en cm de manière à renseigner directement les distances.

Pour préparer l'écran, on plonge un disque de laiton chauffé dans un bain de paraffine et l'on applique le disque sur une feuille de papier tendue. On fait ainsi un certain nombre de taches et l'on choisit la partie du papier qui contient la meilleure. On enlève l'excès de paraffine en étendant sur l'écran un papier buvard qu'on recouvre d'un fer légèrement chauffé. On peut substituer à cet écran deux feuilles de papier accolées dans lesquelles on a percé des trous correspondants et entre lesquelles se trouve une feuille de papier translucide qui remplace la maculature.

Photomètre Joly. — Deux lames parallélipipédiques de paraffine ou de verre laiteux sont accolées et disposées sur le banc photométrique entre les foyers à comparer, de manière que la surface de contact soit normale à la ligne qui joint ceux-ci. En faisant varier la distance de l'un des foyers à l'appareil, on constate que l'une des lames devient alternativement plus claire et plus sombre que la lame voisine. Au moment de l'égalité d'éclat des lames, la ligne de séparation disparaît. C'est la position qui correspond à l'égalité des éclairements. On fait une seconde mesure après avoir retourné l'écran pour compenser l'inégalité éventuelle des deux lames.

La fig. 25 montre un photomètre construit par MM. Hartmann et Braun, dans lequel un écran de Joly peut glisser dans un canal entre deux lanternes où l'on place les deux lampes à incandescence

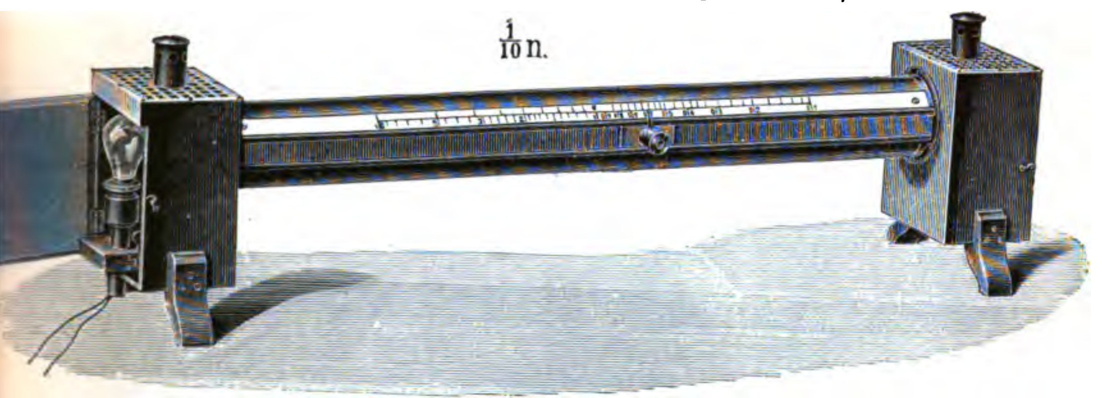


Fig. 25.

à l'étude. Le canal est fermé par une bande d'acier qui s'enroule sur des barillets logés dans les cages extrêmes. Ce dispositif, très simple, permet de comparer les intensités horizontales de deux lampes, dont l'une sert d'étalon, sans qu'il soit nécessaire de se placer dans une chambre noire.

Photomètre Lummer et Brodhun. — L'appareil renferme deux prismes à réflexion totale M et N (fig. 26). Le premier présente une face sphérique dans laquelle on a usé un plan circulaire appuyé, par l'intermédiaire de baume de Canada, sur la face hypothénuse plane du second prisme. Un écran opaque E est éclairé normalement sur ses deux faces par les foyers à comparer *b* et *l*. Les rayons émis par la face de gauche arrivent, après réflexion sur le miroir *m*, dans le prisme M : une partie traverse sans réflexion ni réfraction la surface de séparation des deux prismes et vient frapper l'œil placé devant l'oculaire O. L'observateur perçoit ainsi, sous forme d'une plage elliptique, une partie de la face gauche de l'écran. En même temps, l'œil distingue un champ lumineux entourant le premier et provenant de la lumière émise par la face droite de l'écran, lumière réfléchie sur le miroir *m'* et dont une partie subit la réflexion totale sur la face hypothénuse du prisme N, là où celui-ci n'est pas en contact avec M. On règle les distances des foyers à l'écran de

manière à obtenir l'égalité d'éclairement des deux champs. L'appareil permet le retournement de l'écran, pour éliminer l'influence de l'inégalité des faces de celui-ci. C'est parmi les photomètres connus l'un des plus sensibles.

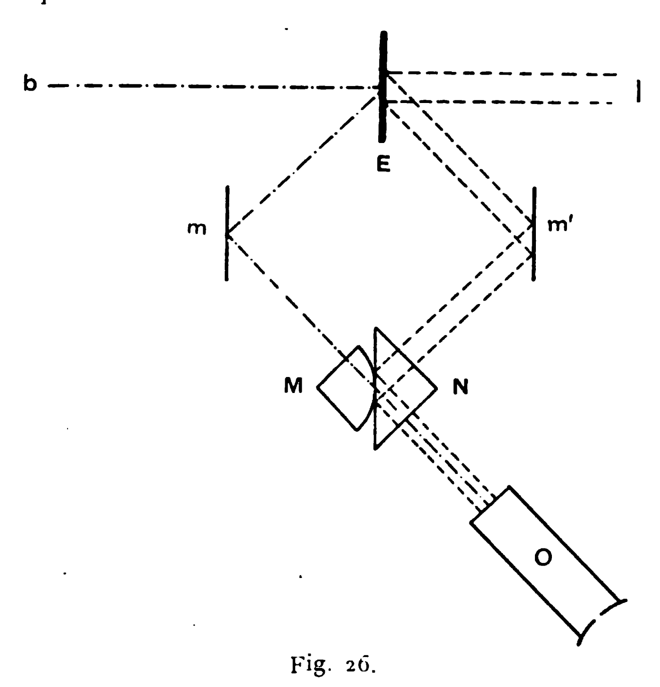


Fig. 26.

Intensité moyenne sphérique. Photomètre Rousseau. — L'intensité lumineuse d'un foyer n'est pas la même dans les diverses directions ; la flamme d'une bougie, par exemple, émet des rayons plus intenses dans les directions horizontales que dans les directions obliques par rapport à l'horizon. Or, la valeur d'un foyer dépend, dans certaines circonstances, de l'éclairement moyen qu'il peut produire, de sorte qu'il est intéressant d'évaluer l'intensité lumineuse, rapportée à l'étalon, non seulement suivant une direction horizontale, mais encore dans les divers azimuts et sous les diverses inclinaisons, l'intensité de la lampe étalon étant considérée suivant une direction invariable.

On arrive à ce résultat en disposant l'écran photométrique de manière qu'il soit frappé sous des incidences égales par les rayons émanant des deux lumières à comparer, quelle que soit la position

du foyer étudié. On construit, à cet effet, des photomètres Bunsen mobiles autour de l'axe *m* (fig. 27), et portant en saillie des boutons *a* et *b* dont les ombres se superposent sur l'écran lorsque celui-ci est orienté suivant la bissectrice des faisceaux incidents.

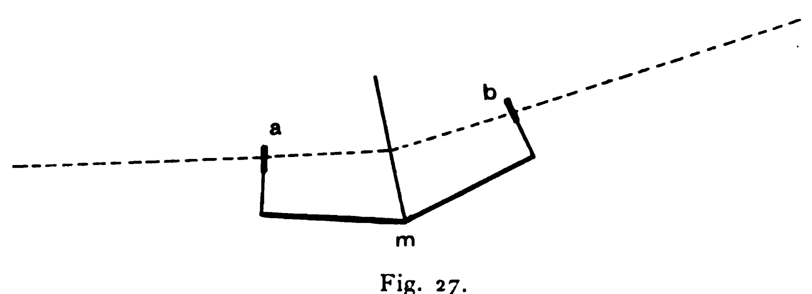


Fig. 27.

Un moyen indirect, qui permet d'utiliser les photomètres ordinaires, consiste à disposer sur le banc photométrique un miroir mobile, susceptible de renvoyer vers l'écran le flux lumineux qu'il reçoit de la lampe essayée, quel que soit l'angle de ce flux avec l'horizontale. On compare l'éclairement de l'écran par le faisceau réfléchi à l'éclairement dû à la lampe étalon, dans diverses positions de la lampe à l'essai. On note l'inclinaison des rayons reçus sur l'écran, ainsi que le parcours total et l'on applique la loi des distances, en tenant compte du coefficient d'absorption du miroir, qui est à peu près indépendant de l'incidence.

On maintient constante la distance de la lampe au miroir, pour ne pas avoir à mesurer cette distance à chaque expérience. On utilise, dans ce but, le procédé suivant (fig. 28). La lampe F est suspendue à l'une des extrémités d'un levier BA pivotant sur une genouillère à l'autre extrémité située sur la verticale passant par le miroir M. La distance de l'axe de rotation B au miroir est égale à la longueur de la corde qui soutient le foyer. Dans ces conditions, quelle que soit la position donnée au foyer, la distance de celui-ci au miroir reste constante et égale à BA.

Pour déterminer le coefficient d'absorption du miroir, on compare à un étalon une autre lampe placée d'abord sur la même ligne que l'étalon et le photomètre, le miroir étant enlevé ; on dispose ensuite la lampe de manière que les rayons arrivant normalement au banc photométrique soient réfléchis par le miroir disposé

à 45°. Soient l et l' les distances, parcourues par les faisceaux incidents de la lampe, correspondant à la même position de l'étalon. En appelant I l'intensité de la lampe et k le coefficient d'absorption, on a

$$\frac{I(1-k)}{I} = \frac{l'^2}{l^2};$$

d'où

$$k = 1 - \frac{l'^2}{l^2}.$$

Ce coefficient varie de 0,6 à 0,9 suivant la nature des miroirs.

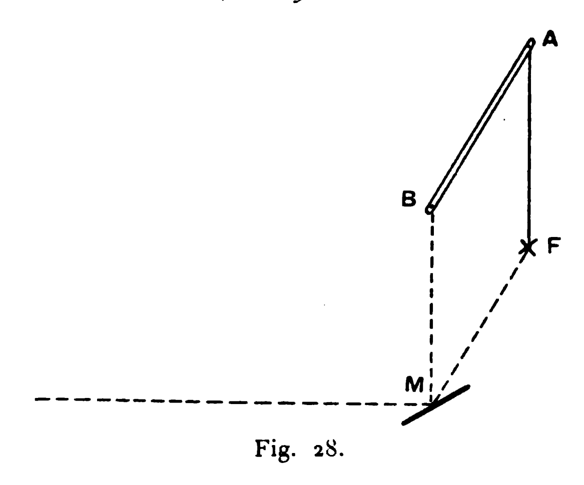


Fig. 28.

La fig. 29 montre un banc photométrique pourvu d'un appareil Lummer et Brodhun, d'une lampe Hefner étalon et d'une lampe à incandescence. Sous celle-ci se voit le miroir destiné à renvoyer vers le photomètre les rayons inclinés d'un foyer lumineux. Sur le sol figurent divers accessoires, entre autres une lentille destinée à la diffusion des faisceaux trop intenses.

Les méthodes ci-dessus exigent que la lampe essayée conserve une intensité lumineuse invariable pendant les mesures successives, sinon les résultats obtenus ne sont pas comparables entre eux. Or, la lumière des lampes à arc, auxquelles on applique particulièrement ce mode d'investigation, est instable. M. Rousseau a admis que, lors des variations de l'arc, les intensités dans les diverses directions conservent les mêmes valeurs relatives,

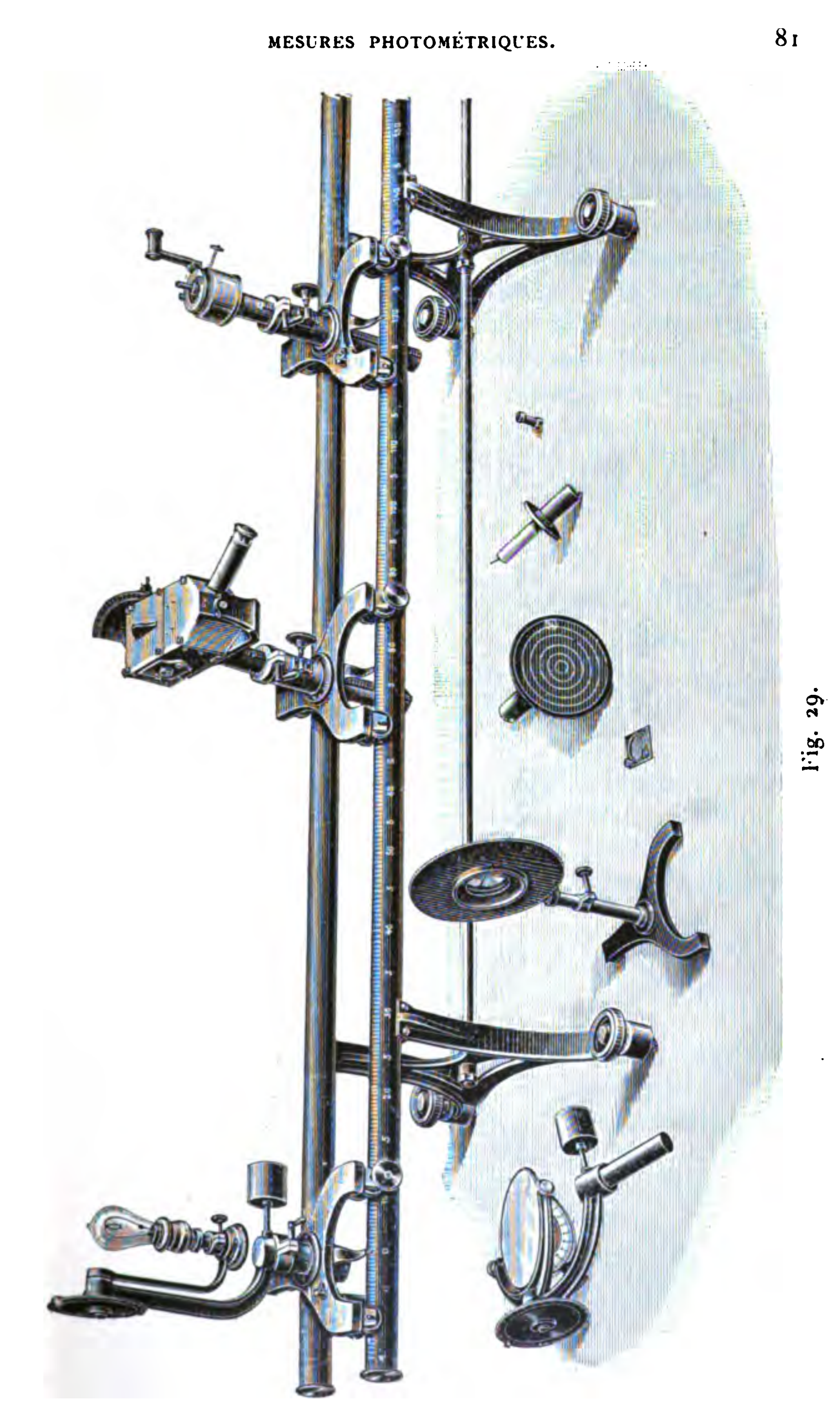


Fig. 29.

et il a réalisé un photomètre au moyen duquel on compare l'intensité de la lumière émise sous divers angles à l'intensité des rayons émis par la même lampe dans une direction déterminée, telle que celle d'intensité maxima.

La lampe est suspendue derrière un disque opaque portant sur sa face antérieure une graduation en 360 degrés. Autour du disque se meuvent deux alidades radiales, munies de miroirs N, M et de

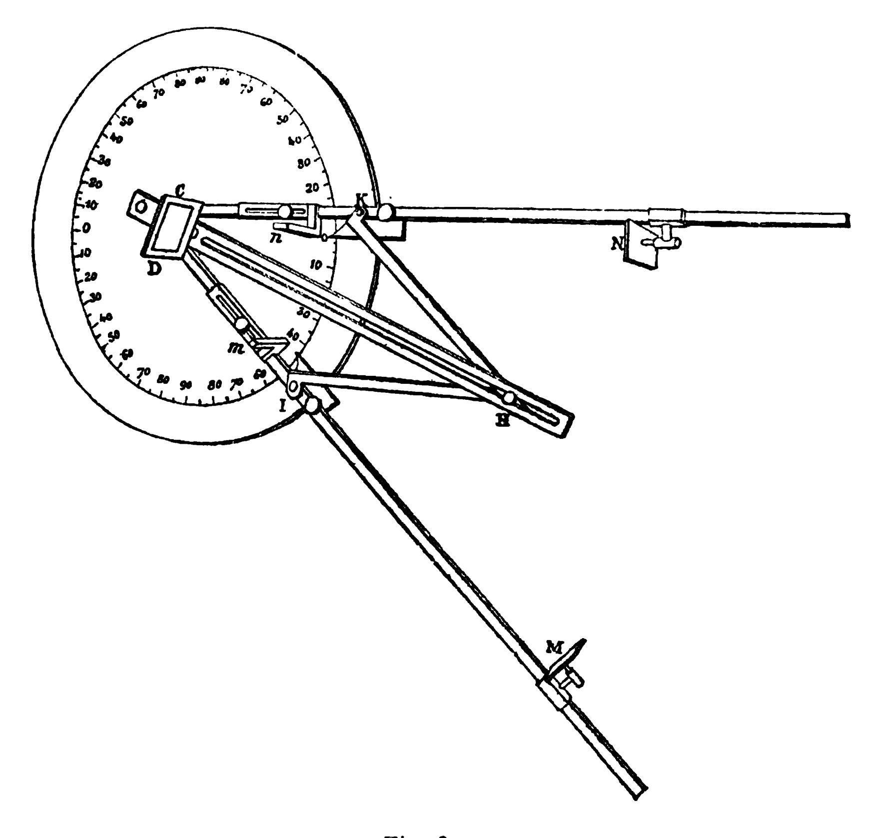


Fig. 30.

tiges métalliques *n*, *m*, destinées à porter ombre sur un écran DC. Ce dernier est fixé normalement à une coulisse H que deux tringles articulées KH et IH maintiennent suivant la bissectrice de l'angle des alidades. Dans le cas de lampes à arc alimentées par un cou-

rant continu, l'une des alidades est disposée suivant la direction à 45° sous l'horizontale, l'autre suivant la direction à laquelle correspond l'intensité relative cherchée. On tourne les miroirs M et N, articulés sur des genouillères, de manière qu'ils réfléchissent la lumière de la lampe sur l'écran DC. Les incidences des rayons sur l'écran sont égales par le fait de la disposition adoptée. Les deux tiges *m* et *n* portent sur celui-ci deux ombres; l'ombre produite par un des faisceaux est éclairée par l'autre faisceau. On déplace les miroirs sur les alidades jusqu'à ce que les ombres paraissent de même intensité. Si alors *d* et *d'* représentent le double des distances de chacun des miroirs à l'écran, on a, en appelant I et I' les intensités des faisceaux comparés,

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Lorsqu'on étudie une lampe à arc à l'aide de cet appareil, les deux ombres présentent des teintes différentes, alors même que les miroirs sont identiques. Cela tient à ce que la composition spectrale des rayons n'est pas la même sous les diverses inclinaisons, par suite de l'hétérogénéïté des parties lumineuses du foyer.

La comparaison, sous une direction unique, de la lampe étudiée avec une lampe étalon fournit la valeur absolue des intensités suivant les diverses directions.

Si l'on porte suivant les diverses directions prises dans un azimut, à partir d'un point A (fig. 31), des longueurs proportionnelles aux intensités lumineuses correspondant à ces directions, l'intensité maxima AE étant représentée par l'unité de longueur, on obtient, pour un arc voltaïque à courant continu, une courbe telle que ABCDEF. Pour une lampe qui rayonne également dans les divers azimuts, la surface obtenue en portant des longueurs semblables sur toutes les directions passant par le point A est une surface de révolution dont la courbe figurée est une section méridienne.

On appelle *intensité moyenne sphérique d'un foyer* la moyenne des intensités considérées tout autour du foyer ou encore le rapport du flux lumineux total à 4π.

M. Rousseau représente la répartition de l'éclairage comme le

montre le côté droit de la figure 31. Des longueurs proportionnelles aux diverses intensités sont portées normalement à une droite P'Q' sur les abscisses correspondant aux extrémités des rayons de la circonférence de centre A. On peut démontrer que l'intensité moyenne sphérique du foyer est à l'intensité maxima AE comme la

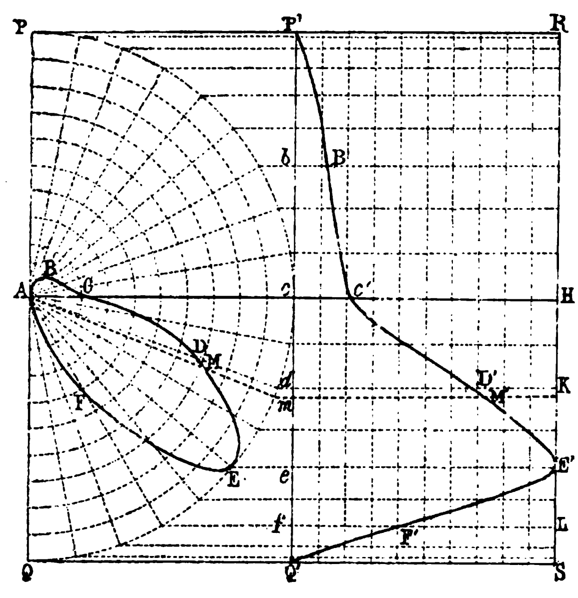


Fig. 31.

surface P'B'C'D'E'F'Q' est à la surface du rectangle P'RSQ'. Soit, en effet, I l'intensité suivant une direction AD faisant un angle α avec l'horizontale. La zone sphérique correspondant à deux rayons infiniment voisins AD et AM a une surface $2\pi \cos\alpha d\alpha$, le rayon de la sphère étant l'unité. Le flux lumineux qu'elle reçoit est $2\pi I \cos\alpha d\alpha$.

L'éclairement moyen de la zone limitée par deux rayons AD et AF, faisant des angles α et α' avec l'horizontale, s'obtient en divisant le flux

$$\Phi = \int I\, d\omega = \int_{\alpha}^{\alpha'} 2\pi\, I \cos\alpha d\alpha.$$

par la surface de la zone correspondante,

$$2\pi\,(1 - \sin\alpha) - 2\pi\,(1 - \sin\alpha') = 2\pi\,(\sin\alpha' - \sin\alpha).$$

Mais, d'après la construction de la figure, la surface $F'fdD'E'$ représente la valeur de l'intégrale

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} \mathrm{I}\, d\alpha \cos \alpha,$$

et, comme le rectangle $dKLf$ a pour hauteur l'unité, il est mesuré par sa base

$$f\,d = \sin \alpha' - \sin \alpha.$$

L'intensité lumineuse moyenne dans la zone considérée est donc

$$\frac{\text{surf. } dD'E'F'f}{\text{surf. } dKLf}.$$

L'éclairement moyen de la sphère entière est donné par le rapport de l'aire curviligne totale à l'aire rectangulaire qui la circonscrit. Par conséquent, pour calculer l'intensité moyenne sphérique en fonction de l'intensité maxima, il suffit d'évaluer les deux surfaces en se servant du planimètre.

Pour les lampes à arc à courant continu, on mesure les intensités lumineuses de 10° en 10° sous l'horizon et de 30° en 30° au-dessus. M. Rousseau a reconnu, en ce qui concerne ces lampes, que l'intensité horizontale varie dans les divers azimuts, par suite de l'obliquité que présente fréquemment le cratère; mais l'intensité maxima, correspondant à un angle d'environ 45° sous l'horizon, est approximativement constante dans tous les plans verticaux passant par le foyer.

Le flux lumineux total émis par un foyer est le produit de 4π par l'intensité moyenne sphérique. Une lampe de 300 bougies décimales (moyenne sphérique) fournit 3 770 lumens.

Lumen-mètre de M. Blondel. — L'intensité moyenne sphérique d'un foyer ayant pour expression le quotient du flux lumineux total émis par 4π, il s'ensuit qu'une méthode qui permet de mesurer ce flux donne indirectement l'intensité cherchée. M. Blondel a imaginé de réfléchir sur un écran diffuseur, à l'aide d'un miroir concave, une fraction connue du flux rayonné par la lampe. Cet écran présente ainsi une image brillante qu'on photomètre par les

méthodes ordinaires. L'appareil, étalonné à l'aide d'une lampe d'intensité connue, permet de déduire l'intensité moyenne sphérique d'une seule mesure.

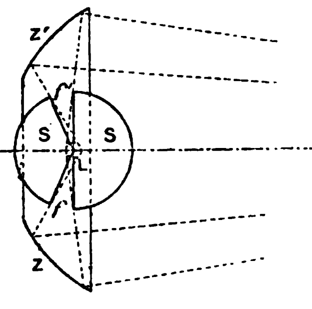


Fig. 32.

Dans un récent modèle du lumen-mètre de M. Blondel, fig. 32, la source étudiée est disposée au centre d'une sphère opaque SS noircie intérieurement et percée de deux ouvertures ff' en forme de fuseaux. Les deux flux de lumière qui sortent par ces fenêtres frappent un miroir concave ZZ' qui les réfléchit sur l'écran diffuseur en une image de petites dimensions. Le flux traversant les fuseaux représente le $^1/_{10}$ du flux total. Si la lumière étudiée éclaire également dans tous les azimuts, une seule expérience suffit; sinon, l'on répète la mesure en faisant tourner le foyer au centre de la sphère.

Courbes d'éclairement. — Les méthodes photométriques étudiées jusqu'à présent ne s'appliquent pas à la mesure directe de la répartition de l'éclairement fourni par un foyer dans une salle ou dans un espace découvert. Pour ce dernier cas, le calcul permet d'arriver à la solution, lorsqu'on connaît l'intensité des rayons émis par les foyers suivant les diverses directions et qu'il n'existe aucune paroi réfléchissante ni diffusante. Ainsi, l'éclairement produit par un rayon lumineux d'intensité I bougies décimales sur une surface distante de r mètres est, en appelant α l'angle d'incidence,

$$\frac{I \cos \alpha}{r^2} \text{ lux.}$$

Supposons qu'on ait calculé d'après cette formule la répartition sur un plan horizontal de l'éclairement fourni par un foyer. On

pourra représenter la distribution de la lumière dans un plan vertical passant par la lampe, en prenant comme abscisses les distances au pied du foyer et comme ordonnées les valeurs de l'éclairement. S'il y a plusieurs foyers en ligne droite, on construira la courbe d'éclairement pour chaque foyer et, en additionnant les ordonnées correspondant à une même abscisse, on déterminera les ordonnées de la courbe d'éclairement résultante.

Voici un autre procédé graphique, emprunté au système des projections cotées, et applicable à des foyers distribués d'une manière quelconque au-dessus du plan horizontal, par exemple aux réverbères éclairant une place publique. Sur un plan de la surface éclairée, on indique la position des sources lumineuses et l'on trace autour de celles-ci des circonférences concentriques, représentant les lieux des points d'égal éclairement relatifs aux foyers considérés isolément. En additionnant, en un nombre de points suffisant, les cotes d'éclairement qui se rapportent aux diverses lampes, il est possible de tracer les courbes d'égal éclairement relatives à l'ensemble des foyers.

Ces procédés ne sont pas exacts lorsqu'il existe des surfaces réfléchissantes, dans une salle par exemple ; il faut alors recourir à la mesure directe de l'éclairement.

Pour évaluer l'éclairement utile moyen d'une surface horizontale éclairée par des lampes à arc, on photomètre une des lampes et l'on détermine le flux envoyé sous l'horizon en planimétrant la partie correspondante de la courbe Rousseau. Le produit de ce flux, en lumens, par le nombre de lampes, divisé par l'aire de la surface en m² donne l'éclairement moyen en lux.

Photomètre L. Weber. — Le photomètre suivant permet de mesurer directement l'éclairement d'une surface. L'appareil comprend deux tubes A et B noircis intérieurement. Le premier est fixé horizontalement sur un pied ; le second est mobile autour de l'axe de A et peut être incliné dans toutes les directions par rapport à l'horizon. Le tube A se termine par une lanterne pourvue d'une lampe auxiliaire, laquelle envoie un faisceau lumineux divergent sur une plaque laiteuse D, qu'on peut mouvoir suivant l'axe du tube à l'aide d'une crémaillère et d'un bouton extérieur. La hauteur de la flamme de la lampe se lit sur une échelle, à travers

une fenêtre allongée, percée dans la paroi de la lanterne. Le tube B, fermé par une plaque laiteuse C, est divisé en deux parties par une cloison *t*. La plaque C est disposée suivant le plan dans lequel on veut mesurer l'éclairement, par exemple, dans le plan horizontal, comme l'indique la figure 33. En regardant à travers

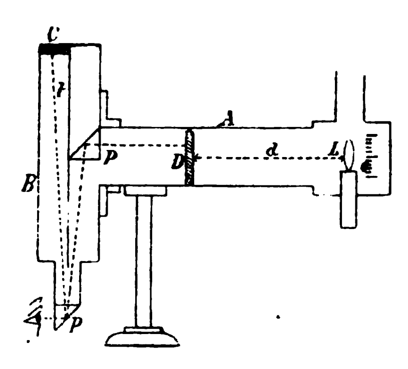


Fig. 33.

l'orifice *p*, directement ou par réflexion dans un prisme, on distingue une partie de la plaque C qu'éclaire, par transparence, la lumière d'un foyer ou la lumière diffuse ; en même temps, on voit, par réflexion totale dans un prisme P, la plaque D éclairée, par transparence, par la lampe auxiliaire. En faisant varier la position de la plaque D, il arrive un moment où les deux plaques se détachent avec la même netteté, ce qui correspond à des éclairements égaux. Or, l'éclairement de la plaque D est, en appelant *d* sa distance à la lampe auxiliaire d'intensité égale à I,

$$\frac{I}{d^2} \text{ lux.}$$

Vu la distance de la lampe à la plaque, on ne commet pas d'erreur sensible en admettant que l'éclairement de cette dernière est uniforme. L'éclairement de la plaque C est exprimé également par $\frac{I}{d^2}$. Pour déterminer I, on vise avec le tube mobile une lampe étalon placée à une distance déterminée de la plaque C et l'on cherche la position correspondante de la plaque D. Lorsque les lumières à comparer sont d'intensités très différentes, on peut employer des plaques plus ou moins absorbantes, qu'on a soin

d'étalonner de même en plaçant devant le tube B, à une distance connue, un foyer étalon.

L'appareil de Weber permet de photométrer les foyers de grandes dimensions, tels que les lampes à arc pourvues de globes laiteux, qui s'étudient difficilement avec quelques uns des photomètres décrits précédemment. A cet effet, on oriente le tube B vers le foyer, de manière que la plaque terminale soit frappée directement par les rayons émanant de la source.

On peut aussi mesurer les éclairements en enlevant la plaque laiteuse C et en visant normalement un écran blanc placé dans le plan dont on cherche l'éclairement. On étalonne alors l'appareil en éclairant l'écran par une source lumineuse connue placée à une distance déterminée, par exemple par une bougie décimale disposée à un mètre, ce qui équivaut à un éclairement d'un lux.

Si les deux lumières sont de colorations très différentes, il est difficile de comparer les éclairements des deux plaques. On a alors recours à l'artifice suivant. On commence par remplacer les plaques laiteuses C et D par des plaques en verre dépoli portant une série de dessins décroissants. On place une lampe étalon à une distance L de C et l'on cherche la distance *d* dont il faut éloigner la plaque D de la flamme de l'appareil pour voir un même dessin avec la même netteté. Les éclairements $\frac{I'}{L^2}$ et $\frac{I}{d^2}$ sont alors égaux.

Si l'on remet ensuite les plaques laiteuses et si l'on regarde à travers un verre rouge, les deux éclairements ne semblent plus égaux ; il faut donner à D une position *d'* pour rétablir l'équilibre. L'intensité de l'étalon n'a plus pour expression $\frac{I L^2}{d^2}$, mais elle est donnée avec le verre rouge par

$$\frac{I L^2}{d'^2} = \frac{1}{K} \frac{I L^2}{d^2}.$$

On tire de là la constante K par laquelle il faut multiplier l'intensité trouvée avec le verre rouge pour obtenir l'intensité réelle.

On peut arriver plus simplement au même résultat en interposant devant l'œil la solution isolant la longueur d'onde $\lambda = 582$ ou un verre vert équivalent.

Photomètre Mascart. — M. Mascart a imaginé un photomètre pour la mesure des éclairements dans lequel le réglage, au lieu de

se faire par le déplacement d'une plaque laiteuse, comme dans l'appareil précédent, s'obtient par l'obturation plus ou moins complète d'une fenêtre traversée par le faisceau lumineux émis à travers la plaque laiteuse (fig. 34). La lampe auxiliaire L, dont la hauteur

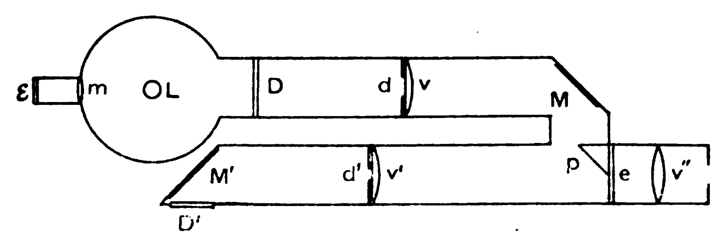


Fig. 34.

de flamme se lit à l'aide de l'image projetée par une lentille m sur une échelle ε, envoie un faisceau lumineux sur une plaque laiteuse D. Celle-ci transmet à son tour un faisceau qui traverse le diaphragme réglable d fixé contre une lentille v ; ce faisceau réfléchi par un miroir M et par un prisme p vient éclairer une partie de l'écran e. Ce dernier est vu nettement par l'œil, grâce à la lentille v'' qui sert à la mise au point.

Une seconde plaque laiteuse D', frappée normalement par la lumière de la lampe étalon ou disposée suivant la surface dont on cherche l'éclairement, transmet un faisceau lumineux, réfléchi par le miroir M', à travers le diaphragme d' et la lentille v' sur l'autre moitié de l'écran e. On règle l'égalité d'éclat des deux plages lumineuses formées sur l'écran, en modifiant l'ouverture des diaphragmes d et d'.

Les éclats des deux plages peuvent être considérés comme proportionnels aux ouvertures des diaphragmes, indiquées sur une petite graduation portée par les vis de réglage, la hauteur des fenêtres restant invariable.

Pour étalonner l'appareil, on dispose une lampe étalon à 1 m de l'écran D', le faisceau lumineux tombant normalement sur celui-ci. L'éclairement Q ainsi réalisé est connu. On détermine les ouvertures l et l' des diaphragmes d et d' qui donnent l'égalité d'éclat des images de D et de D' sur e. En appelant P l'éclairement comparé à Q, on a

$$\frac{P}{Q} = \frac{l'}{l};$$

d'où

$$P = Q\,\frac{l'}{l}.$$

On procède de même pour comparer à P l'éclairement de la plaque D' dû à une lumière quelconque.

Dans un modèle portatif du photomètre Mascart, les diaphragmes sont composés d'un disque percé de trous décroissants ; on fait ainsi varier l'éclairement des plages de l'écran par soubresauts, ce qui facilite le réglage.

Appareil Houston et Kennely. — Cet appareil permet d'apprécier rapidement, d'une manière approximative, l'éclairement en un point d'une salle ou d'un espace découvert illuminés par un nombre de foyers quelconque. Une petite chambre noire est éclairée par une fenêtre F formée d'une glace laiteuse (fig. 35). En face de

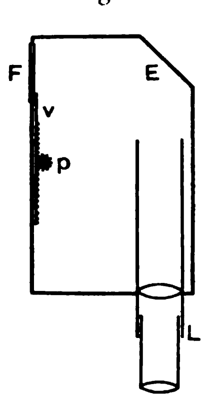


Fig. 35.

celle-ci se trouve un plan E portant des caractères imprimés qu'on regarde à l'aide d'une lunette L, à tirage pour la mise au point. La fenêtre F est placée dans le plan et à l'endroit dont on cherche l'éclairement. A l'aide d'un pignon *p* et d'une crémaillère, on fait glisser un volet *v* pour réduire l'ouverture de la fenêtre jusqu'à la dernière limite de la vision distincte des caractères.

Le volet porte une graduation qui permet d'apprécier l'éclairement de la glace F. Cette graduation est obtenue en plaçant l'appareil dans une chambre noire devant un foyer étalon et en

déterminant les positions du volet correspondant à différentes distances du foyer à la fenêtre. Les degrés de la graduation représentent des lux.

L'erreur moyenne des mesures peut atteindre 10 pour 100, mais l'appareil a l'avantage de ne pas exiger un étalon portatif et de permettre des mesures rapides d'une approximation suffisante pour beaucoup d'applications.

Rendement lumineux des lampes à incandescence. — On évalue l'intensité horizontale moyenne d'une lampe à incandescence en faisant la moyenne des lectures horizontales obtenues dans des azimuts différant de 22°,5 ou de 45°. Le rapport entre l'intensité horizontale moyenne et l'intensité horizontale mesurée dans le plan du filament est voisin de 1,1 en général. Très souvent, on adopte la moyenne horizontale comme terme de comparaison, afin d'abréger les essais. Cette manière de faire est légalisée en Angleterre. Elle concorde d'ailleurs avec la pratique suivie pour les foyers à flamme.

Si l'on veut déterminer l'intensité moyenne sphérique, on cherche, dans divers azimuts, la répartition de l'intensité lumineuse suivant des rayons inclinés sur l'horizon. L'expérience montre que les courbes figurant la répartition de la lumière suivant les diverses sections horizontales faites dans la sphère d'éclairement sont semblables entr'elles et, par suite, semblables à la courbe obtenue dans le plan horizontal passant par le centre de figure de la lampe. Il suffit donc de déterminer la variation de l'intensité lumineuse dans un plan vertical et dans un plan horizontal passant par le centre de la lampe pour pouvoir calculer l'intensité moyenne sphérique de celle-ci.

Pour effectuer ces mesures, on se sert d'un des photomètres décrits précédemment. Afin de ne pas recourir à un miroir, on profite de la propriété que possèdent les lampes à incandescence de pouvoir fonctionner dans une position quelconque. On monte la lampe sur un support mobile autour d'un axe vertical, ce qui permet les observations propres à la détermination de la moyenne horizontale. Les positions de la lampe sont repérées par un index sur une graduation. En vue de la détermination de l'intensité moyenne sphérique, le système peut en outre tourner autour d'un axe horizontal passant par le centre de la lampe. Une seconde graduation repère les positions correspondantes de celle-ci.

Il est commode d'employer, pour les mesures de l'espèce, une lampe à incandescence à filament droit, servant d'étalon auxiliaire et graduée au préalable. Pour obtenir rapidement l'intensité horizontale moyenne, M. Crova a suggéré l'idée de donner à la lampe un mouvement rapide de rotation autour de son axe vertical pendant qu'elle est sur le banc photométrique. On détermine ainsi l'intensité du rayon moyen.

L'intensité lumineuse des lampes à incandescence dépend essentiellement de la puissance qu'elles absorbent. Elle peut être représentée approximativement, d'après M. Voit, par une fonction telle que

$$I = \alpha w^3,$$

dans laquelle I est exprimé en bougies décimales et w en watts. Le coefficient α dépend de la nature du filament et particulièrement de sa surface.

D'après la formule précédente, l'erreur relative qu'on peut commettre dans la mesure de l'intensité lumineuse est triple de l'erreur relative qu'entraîne la détermination de la puissance électrique. Par suite, si les observations photométriques sont faites à 1 pour 100 près, il faut, pour qu'il y ait équivalence, que la puissance soit mesurée avec une approximation de $^1/_3$ pour 100. Or, comme la mesure de la puissance entraîne des lectures au voltmètre et à l'ampèremètre, et comme les erreurs auxquelles exposent ces lectures peuvent être de même sens et s'ajouter, il y a lieu d'employer des instruments suffisamment précis pour ne pas occasionner une erreur supérieure à 0,16 pour 100. On n'arrive à ce résultat que si la source de courant est très constante; des accumulateurs très peu poussés sont seuls susceptibles de satisfaire à cette exigence.

Rendement lumineux des lampes à arc voltaïque. — La lumière émise par une lampe à arc ne présente pas exactement la même distribution dans les divers azimuts à cause des déplacements du cratère, de sorte que la surface photométrique n'est pas de révolution. Pour des mesures de grande précision, il convient de déterminer simultanément, au moins pour des azimuts différant de 180°, les courbes de répartition de l'intensité lumineuse. Toutefois,

les intensités maxima n'offrent pas de différences sensibles; c'est pourquoi l'on se contente généralement de rechercher la répartition des rayons dans un azimut donné, pour faire le calcul de l'intensité moyenne sphérique.

On se rappelle la méthode employée par M. Rousseau pour la représentation graphique des résultats. La courbe obtenue pour une lampe à arc à courant continu montre que les intensités sont assez faibles dans l'hémisphère supérieure, surtout avec les petits arcs, dont le charbon supérieur produit un cône d'ombre très ouvert (fig. 36 et 37).

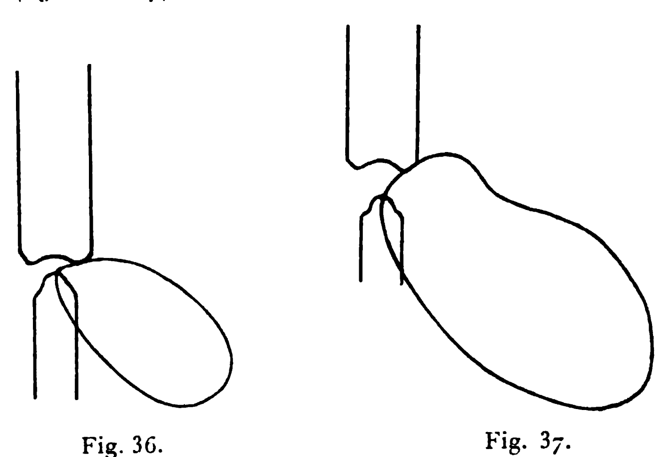


Fig. 36. Fig. 37.

En pratique, pour abréger les mesures, on admet souvent que l'intensité moyenne sphérique d'une lampe à courant continu est donnée par la formule suivante, dans laquelle H représente l'intensité horizontale et M l'intensité maxima mesurée à 45° sous l'horizon,

$$S = \frac{H}{2} + \frac{M}{4}.$$

D'autre part, on a sensiblement

$$H = 0{,}2\ M;$$

d'où

$$S = 0{,}35\ M,$$

soit le tiers environ de l'intensité maxima.

Le flux lumineux projeté en majeure partie sous le plan horizontal, la lumière émise dans l'hémisphère supérieure étant minime, est

$$\Phi = 4\pi S.$$

On doit se rappeler que les globes diffusants modifient complètement la répartition des rayons lumineux, en même temps qu'ils absorbent 15 à 50 pour 100 de la lumière, suivant le degré de leur transparence.

Il faut tenir compte également de ce que les flux lumineux à considérer dépendent des applications. Pour une lampe destinée à éclairer une salle, on doit considérer le flux total, déduit de l'intensité moyenne sphérique; dans le cas de l'éclairage d'un espace découvert, c'est le flux rejeté vers le bas et déduit de l'intensité hémisphérique inférieure qui entre en ligne de compte. Enfin, pour les lampes destinées à éclairer à distance, l'intensité horizontale est seule intéressante.

D'après M. Palaz, l'intensité lumineuse maxima M, en bougies décimales, des arcs à courant continu fonctionnant, à feu nu, sous une tension de 40 à 50 volts, est donnée approximativement, en fonction de l'intensité du courant exprimée en ampères, par la formule empirique :

$$M = 200\,i + 4\,i^2.$$

On en tire

$$S = 0{,}35\ M = 0{,}35\ (200\,i + 4\,i^2).$$

La qualité des charbons a une influence considérable sur le rendement lumineux.

Les arcs alimentés par des courants alternatifs émettent des radiations lumineuses distribuées de la même manière au-dessus et au-dessous de l'horizon. Pour les petits arcs, la courbe de répartition d'un côté de l'axe des charbons comporte deux ailes de papillon à peu près symétriquement disposées par rapport à l'horizontale passant par le foyer (fig. 38). Si la longueur de l'arc augmente, le point de rebroussement disparaît et la courbe prend une forme ovoïde (fig. 39). Si l'on appelle M et M' les intensités maxima, qui sont sensiblement égales, et H l'intensité horizontale,

on a, d'après M. Blondel, pour la valeur de l'intensité moyenne sphérique des arcs de 8 à 12 ampères,

$$S = \frac{H + M + M'}{4}.$$

Dans un essai de *lampe à arc en vase clos* effectué par MM. Eric Gerard et O. De Bast, le foyer, entouré d'un globe laiteux et alimenté par un courant continu, a été réglé de manière à donner une intensité lumineuse moyenne sphérique de 168,8 bougies déci-

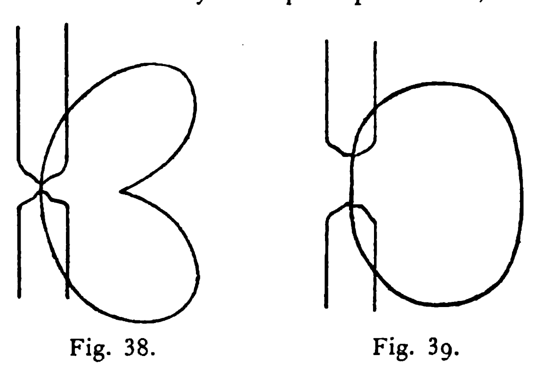


Fig. 38. Fig. 39.

males. Dans ces conditions, la consommation par bougie moyenne sphérique était de 2,9 watts. Après 103 heures de fonctionnement la puissance par bougie s'est élevée à 3,71 watts, valeur comparable à celle que donnent les lampes à incandescence dans le vide.

MESURES ÉLECTRIQUES.

Chapitre IV.

ETALONS DE MESURE.

On a cherché à représenter les unités électriques par des *étalons*, ou tout au moins à définir nettement en fonction de ces unités des grandeurs électriques faciles à reproduire. Certains phénomènes fugitifs, tels que les courants électriques, ne se prêtent pas à la réalisation d'étalons ; dans ces cas, on cherche à fixer la valeur de l'unité à l'aide d'indications fournies par un *appareil-étalon*, dont les éléments de construction sont parfaitement déterminés.

Étalons de résistance. — Pouillet et Werner Siemens ont préconisé l'emploi du mercure pour réaliser un étalon de résistance, parce que ce métal peut être amené plus facilement que les métaux solides à un état de pureté et d'homogénéïté bien défini, grâce à la distillation. Les étalons au mercure peuvent être reproduits avec une approximation de 0,00001, tandis que les étalons solides éprouvent des variations moléculaires capables de faire varier leur résistance de 0,0003 après quelques années, surtout si le fil employé est fin.

Le Congrès des Électriciens de 1881 avait décidé d'adopter pour étalon de l'ohm la résistance à 0°C d'une colonne de mercure de 1 mm² de section et dont la longueur devait être fixée par des mesures ultérieures. Diverses expériences ayant conduit à des longueurs voisines de 106 cm, on a proposé, en 1884, une colonne mercurielle de 1 mm² de section et de 106 cm de longueur pour représenter l'*ohm légal*. D'après les dernières déterminations, la colonne de mercure représentant l'ohm vrai aurait 106,3 cm à 1/5000 près; c'est pourquoi le Congrès de Chicago a défini, en 1893, sous le nom d'*ohm international*, la résistance, à la température de la glace fondante, d'une colonne de mercure pesant 14,4521 grammes, de section transversale constante et d'une longueur de 106,3 cm. C'est à cet étalon que nous nous rapporterons lorsque nous parlerons d'ohms sans autre indication.

1 ohm international = 1,0028 ohm légal.

1 ohm légal = 0,9972 ohm international.

Siemens avait défini, en 1860, une unité arbitraire, désignée par les initiales U. S. et représentée par la résistance à 0°C d'une colonne de mercure de 1 mm² de section et de 1 m de longueur.

1 ohm international = 1,063 U. S.

1 U. S. = 0,9407 ohm international.

On trouve encore dans les laboratoires des boîtes de résistance dont les bobines ont été graduées à l'aide d'un étalon établi en 1864 par l'Association Britannique pour l'avancement des sciences et connu sous les initiales B. A. U.

1 ohm international = 1,01356 B. A. U.

1 B. A. U. = 0,9866 ohm international.



Fig. 40.

Les *étalons prototypes* de l'ohm sont réalisés en remplissant de mercure, purifié par voie chimique, puis par une distillation dans

le vide, un tube de verre soigneusement calibré et terminé dans des coupes élargies (fig. 40). Pour faire communiquer l'étalon avec un circuit extérieur, on plonge dans les coupes des électrodes terminées par des bouts de platine, afin d'éviter de mettre en contact avec le mercure un métal susceptible de l'altérer. Pour tenir compte de la résistance du raccordement du mercure du tube avec celui des coupes, la longueur de la colonne doit être réduite d'une quantité que l'expérience a montré être égale à 0,82 du diamètre du tube.

Les variations de la résistance du mercure avec la température sont indiquées par la formule

$$R_t = R_o (1 + 0{,}0008649\, t + 0{,}00000112\, t^2).$$

Les étalons prototypes sont utilisés à la confection des *étalons secondaires* plus portatifs destinés aux laboratoires. On a construit

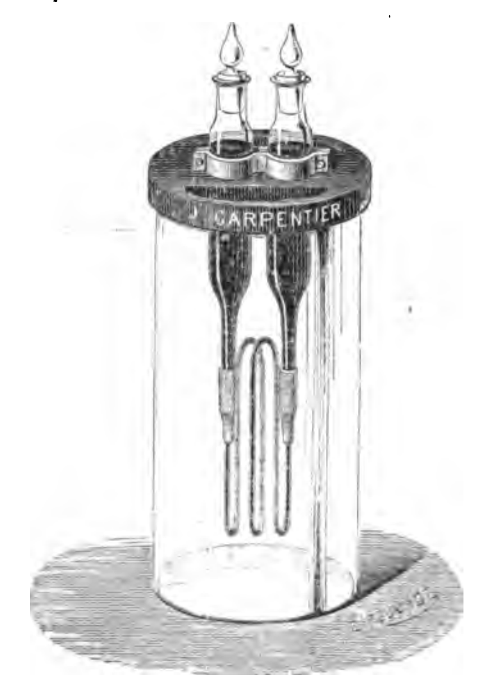


Fig. 41.

des étalons secondaires à mercure ayant la forme représentée dans la fig. 41, mais on utilise de préférence des résistances solides. On

les compose de bobines de fil métallique isolé avec soin et enroulé en double afin d'éviter les effets électromagnétiques extérieurs et de diminuer les réactions de self-induction. L'étalon est pourvu d'un thermomètre destiné à déterminer exactement la température du fil.

On choisit, pour former les étalons secondaires, des métaux ayant une grande résistibilité et un faible coefficient de variation de résistance avec la température. Les alliages sont préférables à cet égard aux métaux purs, comme le montre la table ci-jointe.

NATURE DES MÉTAUX	RÉSISTIBILITÉ EN MICROHMS-CM A 0°C.	COEFFICIENT DE VARIATION DE LA RÉSISTIBILITÉ PAR DEGRÉ, AUX ENVIRONS DE 15° C.
Argent recuit	1,468	0,00400
Cuivre id.	1,561	0,00428
Aluminium id.	2,665	0,00435
Fer id.	9,065	0,00625
Nickel id.	12,323	0,00622
Plomb id.	20,380	0,00411
Maillechort (60 Cu, 25 Zn, 15 Ni)	29,982	0,000273
Platine-argent (33 Pt, 67 Ag)	31,582	0,000243
Manganine (84 Cu, 12 Mn, 4 Ni)	46,678	0,0000
Constantan (60 Cu, 40 Ni)	50,000	0,0000

Parmi les alliages, le maillechort a été longtemps le plus employé ; l'expérience a montré que sa permanence est suffisante. Les alliages de platine sont cependant mieux à l'abri de l'oxydation. La manganine et le constantan sont excellents au point de vue de l'indifférence vis à vis des variations de la température. La première craint, toutefois, les températures supérieures à 150° et son oxydabilité oblige à le protéger par de la soie imbibée de gomme-laque. Le second a un pouvoir thermo-électrique assez élevé vis à vis du cuivre, ce qui le fait réserver pour les rhéostats industriels.

La fig. 42 représente un étalon secondaire formé de spires enroulées en double autour d'une carcasse en ébonite et enfermées

dans une boite en laiton V enduite intérieurement de paraffine P. Le couvercle laisse passer de grosses électrodes en cuivre T T,



Fig. 42.

amalgamées aux extrémités et destinées à être plongées dans des godets à mercure.

Aux moments de l'étalonnage et de l'emploi, la caisse est baignée



Fig. 43.

dans l'eau et un thermomètre indique la température de la chambre intérieure après une durée d'immersion qui ne doit pas être inférieure à plusieurs heures.

Les étalons secondaires construits pour le *Reichsanstalt*, de Berlin, fig. 43, sont constitués par des bobines en fil de manganine isolé avec de la soie imbibée de gomme-laque, qu'on plonge dans le pétrole afin d'atteindre rapidement l'équilibre de température. Les bobines nouvellement enroulées subissent des modifications moléculaires lentes, qui entraînent des changements de résistibilité électrique. Afin d'accélérer la mise en service des bobines, on a eu l'idée d'appliquer un procédé analogue à celui dont on fait usage pour vieillir les thermomètres. On recuit la bobine enroulée dans une cuve à air, à une température de 115° à 120°, pendant quelques heures. Le fil atteint ainsi rapidement un équilibre moléculaire permanent. Les étalons des multiples et des sous-multiples de l'ohm, de 50 ohms à 0,0001 ohm, sont constitués par deux conducteurs dérivés ; l'un de section relativement forte, présente une résistance légèrement supérieure à la valeur requise ; l'autre, beaucoup plus mince, est réglé jusqu'à obtenir la résistance combinée voulue. Les faibles résistances, 0,001 ohm et en dessous, étant destinées à recevoir des courants intenses, sont placées dans un bain de pétrole, agité par le moyen d'une roue à palettes pour maintenir l'équilibre de température. Sur la résistance médiane de la fig. 43, on voit l'extrémité de l'axe de l'agitateur auquel on communique un mouvement de rotation par un moteur électrique. Deux tubulures latérales servent à établir une circulation d'eau. Les deux grosses bornes permettent l'amenée du courant et les petites le raccordement du galvanomètre destiné à la mesure de la différence de potentiel aux extrémités de la résistance.

Le double enroulement, généralement usité pour les étalons en vue de diminuer l'inductance, a l'inconvénient de rapprocher les spires à des potentiels différents, ce qui favorise les dérivations dans le cas où le fil n'est pas très bien isolé et donne aux bobines une capacité qui n'est pas négligeable.

M. Chaperon préfère former les bobines par couches successives enroulées en sens inverses et comprenant des nombres égaux de spires. Les couches sont séparées par des épaisseurs d'étoffe de soie.

M. Feussner a suggéré un autre procédé qui donne une self-induction et une capacité négligeables. Le fil simple est enroulé en une seule couche sur une lame mince de mica. Si la résistance est faible, on fait le bobinage avec une bande de métal, ondulée pour permettre les dilatations. La bobine plate ainsi formée est vernie à la gomme-laque et serrée entre deux plaques de mica qui débordent celle qui sert de carcasse à la bobine.

Ce dispositif assure un excellent isolement. De plus, il peut se monter dans des caisses à claire-voie où l'on ménage une circulation d'air ou d'un liquide isolant afin de permettre l'adoption de densités de courant plus grandes que dans les bobines ordinaires.

Boîtes de résistance. — Pour les besoins de la pratique, on construit des boîtes étalonnées à 1/1000 près, contenant des multiples et parfois des sous-multiples de l'ohm. Ces boîtes, en acajou, portent un couvercle en ébonite sur lequel sont fixés des blocs de laiton auxquels sont soudées les extrémités des bobines étalons. Celles-ci peuvent être éliminées du circuit par

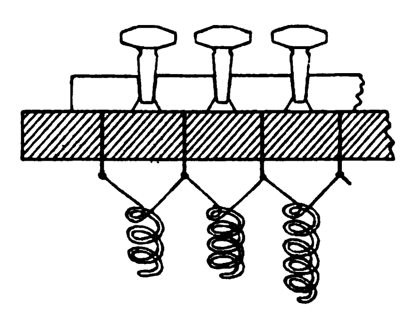


Fig. 44.

l'insertion de broches métalliques mettant en communication directe les blocs reliés aux deux bouts du fil d'une même bobine (fig. 44). Les résistances groupées communément dans ces boîtes ont 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 200, 500, 1000, 2000, 2000, 5000 ohms. On adopte aussi la série 1, 1, 2, 5, 10, 10, 20, etc., ou encore 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30, 40, etc.

En combinant ces bobines, on peut former toutes les résistances, différant d'un ohm, comprises entre 1 ohm et la somme des

résistances partielles. Le système offre l'inconvénient d'obliger à une addition pour déterminer une résistance. De plus, les bobines mises en court-circuit sont nombreuses et, comme chaque cheville présente des résistances de contact de l'ordre du $^1/_{10000}$ d'ohm, il s'ensuit une erreur parfois très appréciable sur le

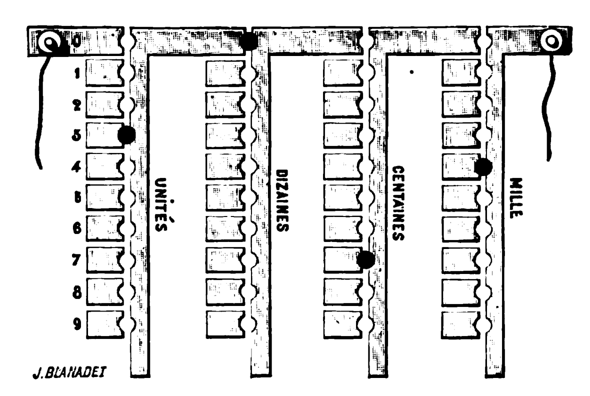


Fig. 45.

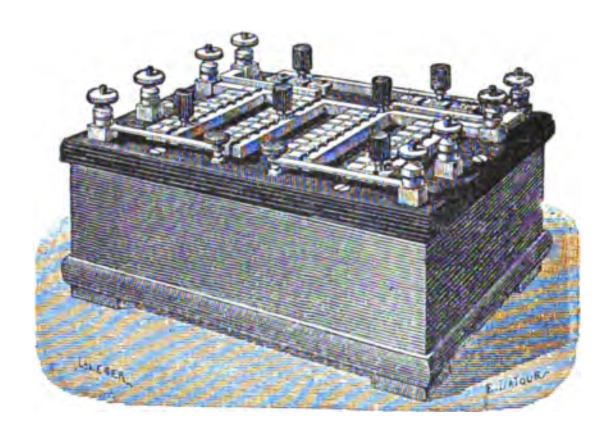


Fig 46.

résultat. Ainsi lorsqu'on *débouche* la résistance d'un ohm en laissant 15 chevilles insérées, une résistance de contact de $^1/_{10000}$ pour chacune d'elles conduit à une erreur de 0,15 pour 100 sur la résistance totale. Pour diminuer autant que possible l'erreur, il faut avoir soin de nettoyer de temps en temps les chevilles au

papier d'émeri fin et de s'assurer qu'elles sont bien enfoncées, les vibrations pouvant les desserrer. Il faut vérifier également si la plaque d'ébonite qui forme le couvercle de la boîte est bien propre et l'épousseter au besoin avec un blaireau ou une bande de cuir, les traînées de poussière conductrice constituant des dérivations entre les blocs de laiton. A la longue, l'ébonite s'altère, particulièrement quand elle est exposée à la lumière et à l'humidité. Le soufre qu'elle contient vient former, à la surface, un enduit blanchâtre et conducteur qu'il faut enlever en repolissant le couvercle.

Afin de faciliter les combinaisons de résistances et de diminuer le nombre des chevilles employées, on a imaginé les *boites à décades*. Dans ce système, représenté par les fig. 45 et 46, on se sert de 9 bobines de 1 ohm, 9 de 10 ohms, 9 de 100 ohms, etc. Ces bobines sont montées en série entre de petits blocs de laiton. A l'aide d'une seule broche insérée entre un des petits blocs et une barre de laiton voisine, on peut mettre en circuit tout ou partie des bobines de chaque série. Ainsi, pour former la résistance 4703, il suffit de 4 broches disposées dans les orifices portant les indications 4000, 700, 00 et 3. On évite de la sorte l'addition exigée par le premier système. De plus, la correction nécessaire pour tenir compte des résistances de contact reste toujours la même. Cette deuxième disposition exige plus que le double du nombre des bobines nécessaires à la première, ce qui rend les boites plus volumineuses et plus chères.

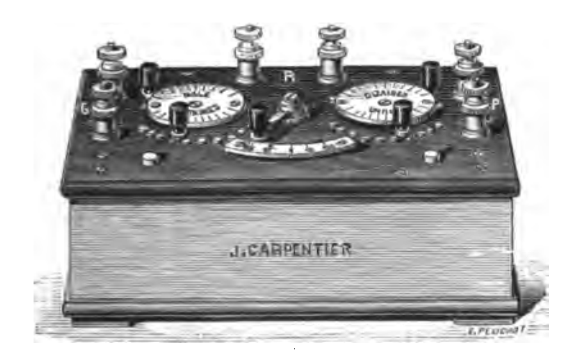


Fig. 47.

Pour hâter les manœuvres, on substitue parfois aux broches une manette pour le réglage des résistances (fig. 47).

M. Feussner a imaginé une combinaison qui réunit les avantages des deux premiers dispositifs. Chaque décade est remplacée par un groupe de 5 résistances pouvant être associées en série, de manière à former, à l'aide d'une seule cheville, une résistance totale indiquée devant l'orifice correspondant. La fig. 48 représente la disposition propre à former les résistances comprises entre 1 et 9 ohms à l'aide de 5 bobines de 1, 1, 1, 1 et 5 ohms.

Les diamètres des fils employés pour former les résistances artificielles diminuent à mesure que celles-ci augmentent, attendu que, pour une même différence de potentiel appliquée aux bornes de la boîte, les courants décroissent en raison inverse de la résistance débouchée dans cette dernière. La densité de courant admissible dépend de la résistibilité du fil employé. Avec le maillechort, les bobines de 1 ohm sont enroulées de fil de 1 mm de diamètre; pour celles de 10 ohms, on adopte 0,4 mm; pour celles de 100 ohms, 0,25 mm et pour celles de 1000 ohms ou plus 0,1 mm. La couverture isolante du fil comprend deux couches de soie blanche guipées en sens inverses ou une tresse de même matière.

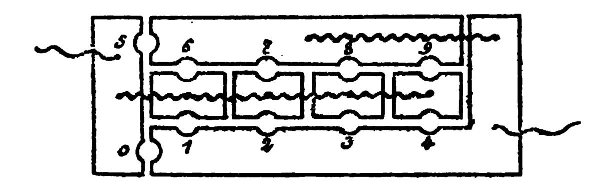


Fig. 48.

Pour construire une bobine, on commence par mesurer la résistance du fil par mètre, et l'on prépare une longueur de fil propre à réaliser un peu plus que la résistance désirée. Le fil est plié en double et enroulé sur une carcasse en bois imprégné de paraffine ou en toute autre susbtance isolante non hygroscopique.

L'une des extrémités du fil est soudée à une tige de cuivre fixée par soudure à l'un des blocs de laiton du couvercle de la boite. L'autre extrémité est serrée dans une fente faite dans la tige

reliée au bloc voisin et est glissée dans cette fente jusqu'à ce qu'on obtienne la résistance voulue; après quoi, l'on soude cette seconde extrémité. La bobine est imprégnée de paraffine pour éviter l'oxydation du fil et les dérivations par l'humidité. Après quelques mois, il est nécessaire de vérifier la résistance de la bobine, qui peut avoir changé par suite du travail moléculaire du métal. On ajuste à nouveau la résistance, soit en renforçant une des extrémités du fil par une addition de soudure, soit en grattant le fil. On a vu qu'on peut accélérer ces opérations en recuisant le fil après l'enroulement, de manière à lui donner immédiatement son état moléculaire définitif. Avec les gros fils, on opère le réglage sur une dérivation établie sur la bobine entière ou sur une partie de celle-ci. Avec les fils minces, on soude aux extrémités des fils plus forts qui servent au réglage et aux connexions avec les bornes.

Le couvercle des boîtes de résistance est pourvu d'un orifice pour l'insertion d'un thermomètre. Toutefois, par le fait de la paraffine qui recouvre le fil, plusieurs heures sont nécessaires pour obtenir l'équilibre de température. Si les bobines sont isolées à la gomme-laque, on préfère laisser une libre circulation d'air dans la boîte qui est percée de trous à cette fin. Il faut avoir soin de ne jamais faire passer dans les bobines des courants intenses ou de longue durée. Les bobines doivent être soumises à une différence de potentiel limite variant avec leur résistance et qui va de 0,3 à 30 volts pour les bobines de 1 à 10 000 ohms. Tout circuit contenant une caisse de résistance doit être commandé par une clef qui est fermée seulement pendant la durée des lectures.

Si les fils n'éprouvent pas de modifications de température supérieures à celles qu'on observe dans les laboratoires, la correction relative aux variations correspondantes de résistance est négligeable, lorsque les bobines sont en manganine ou en un alliage analogue.

Rhéostats. — Les boîtes de résistance ne permettent pas de varier la résistance comprise entre leurs bornes par degrés insensibles, condition requise dans certaines expériences. Ce résultat est atteint par les rhéostats.

La forme la plus simple est le rhéocorde qui consiste en un fil tendu parallèlement à une règle divisée, entre deux blocs de cuivre

auxquels il est soudé. Un curseur glisse sur le fil de manière à présenter avec celui-ci un contact bien défini. La longueur comprise entre l'une des extrémités du fil et le curseur est insérée dans le circuit en expérience et mesurée par la règle.

Pour réaliser une longueur plus considérable dans un faible espace, l'on enroule le fil en hélice sur un cylindre d'ébonite. Le cylindre tourne autour de son axe dont une des extrémités est filetée et passe dans un écrou, disposition qui communique au cylindre un mouvement de translation. Un doigt de contact immobile permet d'insérer une longueur variable du fil dans le circuit. Ces appareils laissent à désirer au point de vue des contacts mobiles et ne peuvent servir qu'avec des courants de faible intensité.

Si l'on ne désire pas des résistances définies, mais seulement des résistances variables par degrés, on peut employer des rhéostats à liquide consistant en une solution aqueuse d'un sel reliée au circuit extérieur par des électrodes en même métal que celui du sel. On adopte, par exemple, le sulfate de cuivre ou le sulfate de zinc, avec des électrodes en cuivre ou en zinc, de manière à éviter la polarisation. On fait varier la résistance en plongeant plus ou moins les électrodes dans le bain ou en changeant leur écartement.

Résistances artificielles pour courants intenses. — Les rhéostats à liquide peuvent servir pour les courants intenses, à la condition de proportionner la surface des électrodes à l'intensité du courant. Ces appareils ont l'inconvénient de varier très notablement de résistance avec la température.

Une autre combinaison consiste à disposer des fils ou bandes minces, enroulées en hélice, entre des blocs de cuivre qu'on réunit par des chevilles ou des manettes, comme dans les boîtes de résistance. Pour les courants très intenses, on groupe les conducteurs en dérivation, de manière à faire croître la section avec l'intensité du courant. Les éléments en dérivation doivent avoir une résistance individuelle relativement plus grande que dans la disposition en série, attendu que, dans le premier cas, la résistance d'un élément constitue la résistance maxima disponible. On a aussi fait usage de toile métallique pour obtenir une grande surface de refroidissement.

Lorsque la différence de potentiel appliquée aux résistances est inférieure à un volt, on peut immerger les conducteurs dans l'eau

sans crainte de décomposer ce liquide. On active ainsi le refroidissement des fils, surtout si l'on entretient un courant d'eau. On peut alors forcer la densité du courant électrique dans les conducteurs.

On a également préconisé l'usage de tubes conducteurs dans lesquels passe un courant d'eau.

On obtient des résistances variables par degrés insensibles, en empilant des plaques de charbon artificiel. On gradue le courant qui traverse la pile de plaques en modifiant les résistances de contact par une compression variable obtenue à l'aide d'une vis de serrage.

Lorsque les résistances artificielles doivent être soumises à des tensions de l'ordre des centaines de volts, on utilise souvent des lampes à incandescence dans le vide qui peuvent être groupées en série ou en dérivation. Les lampes permettent de constituer des résistances économiques qui ont l'avantage, lorsqu'il s'agit de courants alternatifs, d'être à peu près dépourvues de self-induction. On évite également la self-induction et l'on obtient de grandes résistances sous un faible volume en utilisant un mélange cuit d'argile et de graphite. On varie la conductibilité en modifiant la proportion de graphite. Avec des proportions égales des deux substances, on obtient une résistibilité de 0,12 ohm-cm (Fleming). De telles résistances sont capables de supporter des températures relativement élevées.

Étalons de quantité d'électricité et d'intensité de courant. — Les phénomènes d'électrisation et de courant électrique étant temporaires ne se prêtent pas à la réalisation d'étalons permanents, mais on peut déterminer le poids d'un métal déposé dans un bain électrolytique par l'unité de quantité d'électricité. D'après la décision du Congrès de Chicago, l'*ampère international* est représenté par le courant qui, traversant une solution de nitrate d'argent dans l'eau, dépose 0,00118 gramme d'argent par seconde. On verra, à propos du tarage des galvanomètres, les précautions exigées pour effectuer le dépôt dans les conditions normales. Cette définition règle également le *coulomb international*. La même quantité d'électricité dépose 0,0003287 gramme de cuivre.

On fait aussi usage d'électrodynamomètres étalons de construc-

tion bien définie dont les indications correspondent à des courants déterminés. (Voir ci-après les balances de Lord Kelvin et de M. Pellat).

Étalons de force électromotrice. — Quelques éléments voltaïques développent, dans des conditions déterminées, une force électromotrice suffisamment constante pour servir d'étalons.

L'un des éléments les mieux étudiés est l'élément normal de Latimer-Clark. Sous la forme recommandée par le *Board of Trade*, de Londres, l'élément comprend un fil de platine plongeant dans le mercure versé au fond d'un tube à réactif noirci extérieurement. Au dessus du mercure se trouve une pâte de sulfate de zinc et de sulfate mercureux, préparée à froid et dans laquelle est placé un bâton de zinc (fig. 49.)

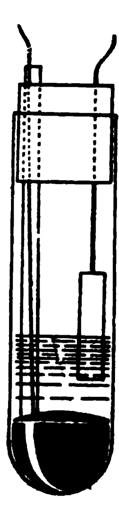


Fig. 49.

Le mercure doit être purifié par l'acide sulfurique concentré, puis distillé dans le vide. Le zinc doit être redistillé. La tige de ce métal est soudée à un fil de cuivre, décapée dans l'acide sulfurique dilué, puis lavée à l'eau distillée et séchée sur du papier à filtrer.

Pour préparer la pâte, on commence par ajouter à du sulfate de zinc du commerce, purifié par une seconde cristallisation, 50 pour 100 de son poids d'eau et 2 pour 100 d'oxyde de zinc destiné à

neutraliser l'acide libre. On effectue la dissolution à une température qui ne doit pas excéder 30° C. On incorpore dans la solution 12 pour 100 de sulfate mercureux, en vue de transformer l'excès d'oxyde de zinc en sulfate; on filtre pour éliminer l'oxyde mercureux formé et on laisse cristalliser par refroidissement. Pour obtenir le sulfate mercureux à employer, on se procure du sulfate mercureux commercialement pur, on le lave à l'eau distillée froide, l'on décante et l'on répète deux fois cette opération, qui a pour effet d'éliminer le sulfate mercurique, reconnaissable à sa teinte jaune. On mélange ensuite les cristaux de sulfate de zinc avec du sulfate mercureux et une petite quantité de mercure; à l'aide de la solution concentrée de sulfate de zinc, on donne au mélange la consistance d'une crême. On agite énergiquement en maintenant une température n'excédant pas 30° C. Lors du refroidissement, il doit se former des cristaux de sulfate de zinc dans toute la masse; s'il n'en est pas ainsi, on ajoute quelques cristaux et l'on répète l'opération.

Le tube à réactif mesure 2 cm de diamètre et 6 à 7 cm de longueur. Le mercure occupe 1,5 cm de hauteur; on y fait plonger le fil de platine qui est protégé, hors du mercure, par un tube de verre dans lequel il est scellé. La partie du fil qui doit être immergée dans le mercure est chauffée au rouge au préalable. La pâte est versée dans le tube sur une hauteur de 2 cm. On enfonce la tige de zinc dans la partie supérieure de la pâte et l'on ferme le récipient par un bouchon de liége lavé à l'eau chaude et percé de trous pour le passage des électrodes ainsi que de l'air. On laisse reposer l'élément pendant 24 heures et on le scelle à la glu marine. Lors de l'emploi, on le place dans un bain d'eau, afin d'en déterminer facilement la température.

On recommande de n'utiliser cet élément qu'en circuit ouvert avec des électromètres ou des condensateurs, ou seulement dans les méthodes de compensation où il n'a à débiter que des courants très faibles.

La force électromotrice de cet élément est 1,4336 volt international à 15° C, à moins d'un millième près. A une température t, voisine de 15°, la force électromotrice est donnée par la formule

$$E = 1,4336 - 0,001\,(t - 15)$$

L'élément précédent n'est pas portatif, car un renversement peut amener le mercure en contact avec le zinc. Une disposition moins précaire peut être réalisée par l'emploi d'un tube en forme de H. A la partie inférieure d'une des branches on verse un amalgame contenant 10 pour 100 de zinc et 90 pour 100 de mercure. Un fil de platine scellé dans le verre vient plonger dans cet amalgame.

Il résulte des expériences de M. Skinner, que l'élément Clark peut fournir, sans danger, un courant de 0,0001 ampère par centimètre carré de surface de l'électrode en zinc. L'élément du Board of Trade peut, d'après cela, être mis en circuit sur une résistance de 10 000 ohms. Au bout d'une heure, la force électromotrice ne diminue, dans ces conditions, que de 0,0002 de sa valeur initiale.

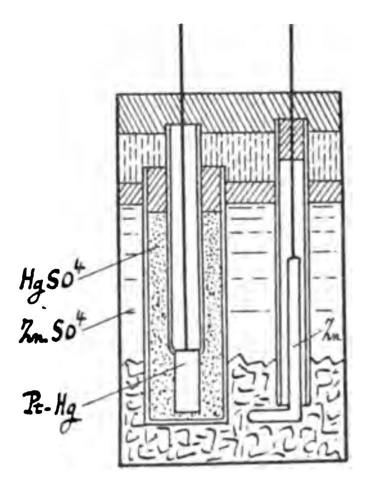


Fig. 50.

Afin de rendre l'élément transportable, le *Reichsanstalt* a adopté la disposition suivante (fig. 50). Le pôle positif est constitué par une lame de platine amalgamé, plongeant dans la pâte de sulfates contenue dans un vase poreux. La lame communique avec l'extérieur par un fil de platine traversant un tube de verre. Le pôle négatif est un bâton de zinc amalgamé traversant aussi un tube de verre et recourbé à son extrémité inférieure, où il est en contact avec des cristaux de sulfate de zinc noyés dans une solution con-

centrée de ce sel. L'élément est fermé par un bouchon de liége, une couche de paraffine et une couche de résine. Un thermomètre, non indiqué dans le dessin, plonge dans la solution zincique. Le vase extérieur en verre est placé dans une enveloppe métallique protectrice fermée par un couvercle en ébonite qui porte les bornes d'attache. L'élément mesure 10 cm de hauteur et 6 cm de diamètre. Il peut donner un courant de 100 micro-ampères pendant quelques instants. Ce couple constitue une ressource précieuse pour les opérations d'étalonnage. Sa force électromotrice est

$$1{,}434 - 0{,}001\,(t - 15) \text{ volt.}$$

Si une approximation de 1/100 est suffisante, on peut se contenter d'employer des substances commercialement pures, en ayant soin de préparer la pâte à froid, après avoir vérifié si elle est exempte de sulfate mercurique jaune, d'amalgamer le zinc et de faire plonger un simple fil de platine dans du mercure placé au fond du vase poreux. On obtient ainsi un couple qui est susceptible d'une plus grande précision que la plupart des combinaisons à base de sulfate de cuivre qui ont été employées. On peut faire produire à cet élément un courant d'environ 0,0001 ampère par cm^2 d'électrode en zinc.

M. Gouy emploie, comme dépolarisant, le bioxyde jaune de mercure disposé au dessus d'une couche de mercure dans laquelle plonge un fil de platine. Un bâton de zinc amalgamé, protégé par du papier à filtrer, baigne dans une solution de sulfate de zinc à la densité 1,06. L'élément, destiné à fonctionner à circuit ouvert, donne

$$1{,}386 - 0{,}0002\,(t - 12) \text{ volt.}$$

M. Weston a modifié l'élément Clark en remplaçant le zinc par un amalgame de cadmium et le sulfate de zinc par du sulfate de cadmium. L'amalgame, préparé à 100° C et contenant 1 de cadmium pour 6 de mercure, entoure le fil de platine scellé au fond de l'une des branches d'un tube de verre en forme de H ; dans l'autre branche, le fil de platine est recouvert de mercure (fig. 51). Des cristaux de sulfate mercureux lavés et bien dépourvus de cristaux de sulfate mercurique sont broyés dans un mortier avec une solution

saturée et neutre de sulfate de cadmium, de façon à former une pâte sirupeuse. On peut remplir l'élément avec cette pâte ou bien se contenter d'en recouvrir la couche de mercure déposée dans le tube de droite. Dans ce dernier cas, on recouvre l'amalgame de gauche par des cristaux de sulfate de cadmium et l'on achève de remplir l'élément avec une solution concentrée de sulfate de cadmium. L'élément est bouché par des couches de paraffine, des bouchons de liége et des scellements à la cire à cacheter. Il présente l'avantage de prendre immédiatement sa force électromo-

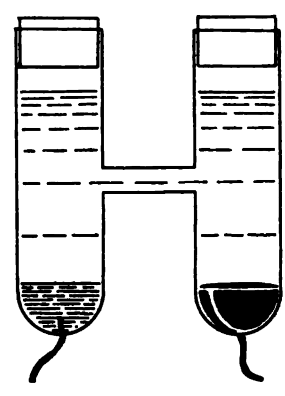


Fig. 51.

trice normale de 1,019 volt international à 20° C, tandis que l'élément Clark doit reposer quelques semaines avant l'emploi. Le coefficient de variation de la force électromotrice avec la température n'atteint que 0,004 pour 100 par degré centigrade, tandis qu'il est de 0,1 pour 100 pour l'élément Clark. Il peut être négligé dans les mesures industrielles. La formule de correction est

$$E_t = 1{,}019 - 3{,}8\,(t - 20)\,10^{-5} - 0{,}065\,(t - 20)^2\,10^{-5}.$$

Lorsque les étalonnages exigent des courants d'une certaine intensité, l'on emploie parfois des éléments à sulfate de cuivre ou des accumulateurs, qu'on tare au préalable à l'aide d'un couple étalon.

On a peut-être eu tort de définir des étalons pratiques pour l'ohm, le volt et l'ampère, parce que ces 3 quantités sont unies par a loi d'ohm. Or, tandis que l'ohm international et le volt (entendu

comme la $\frac{1000^e}{1434}$ partie de la force électromotrice de l'élément Clark à 15° C) peuvent être reproduits à 0,01 pour 100 près, l'étalon de l'ampère, défini par l'électrolyse, n'est guère susceptible d'une approximation supérieure à 0,1 pour 100. De plus, on soupçonne déjà une différence de 0,1 pour 100 entre le volt vrai et l'étalon déduit du Clark.

Dans ces conditions, il serait préférable de s'en tenir à 2 étalons, l'ohm et le volt par exemple, et de faire les mesures par les méthodes potentiométriques qui seront étudiées plus loin et ne comportent que l'emploi de ces étalons.

Étalons de capacité. — L'unité usuelle de capacité est le microfarad. Elle est représentée par des condensateurs plans dont les armatures sont constituées par deux cahiers de feuilles d'étain. Ces feuilles sont alternées et isolées par des feuilles de mica exempt d'oxydes métalliques. Les feuilles d'étain de chaque cahier ont un coin coupé et elles sont réunies par un autre coin entre elles et à un

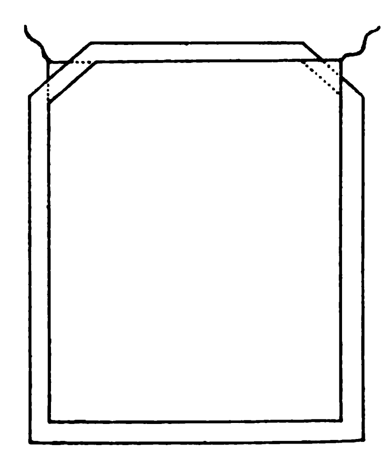


Fig 52.

fil de cuivre, la jonction étant assurée au moyen d'une soudure à basse température. Les feuilles des deux cahiers sont empilées de manière que les coins coupés d'un des cahiers correspondent aux coins soudés de l'autre (fig. 52). Les feuilles de mica débordent tout autour des feuilles d'étain, afin d'assurer l'isolement de celles-

ci. Elles ont deux coins coupés qui laissent dépasser les coins soudés des feuilles d'étain.

On a soin de mettre assez de feuilles d'étain pour obtenir une capacité un peu supérieure à celle à laquelle on désire arriver. Lorsque les feuilles sont empilées et serrées, on étalonne le condensateur en déchirant des feuilles d'étain jusqu'à ce qu'on ait atteint la capacité voulue. On met alors le bloc dans une caisse en bois, sur un lit de paraffine, et l'on remplit la boîte de paraffine. L'intervalle entre l'étain et la boîte doit être suffisant pour que celle-ci ne puisse jouer le rôle d'armature. Les fils de cuivre sont fixés à des blocs de laiton portés par le couvercle en ébonite de la boîte.

M. Bouty a réalisé des condensateurs de très petit volume, en formant les éléments de plaques minces de mica argentées sur une face.

Dans les condensateurs à bas prix, on remplace le mica par le papier paraffiné qui n'a pas la même permanence, surtout lorsque la paraffine a été blanchie par un acide incomplètement éliminé. Les condensateurs à mica sont exacts à 0,001 près, tandis que ceux qui utilisent la paraffine ne donnent guère que l'approximation de 0,005.

La tension à laquelle on soumet les condensateurs ordinaires ne doit pas dépasser 100 volts, et il convient d'éviter les extra-courants donnant une tension anormale. On fabrique des appareils spéciaux pour les hautes tensions alternatives qui donnent lieu à des effets d'hystérésis diélectrique. [1]

La fig. 53 montre la vue extérieure d'un appareil qui comporte 5 subdivisions du microfarad. Chacune des parties du condensateur communique, d'une part, avec l'une des barres longitudinales et, d'autre part, avec un des blocs centraux. A l'aide de fiches, on peut associer les éléments divisionnaires en surface.

Lorsqu'un condensateur est inactif, il faut avoir soin de réunir les deux armatures par une fiche métallique, afin de neutraliser les charges résiduelles.

Pour certaines études, on doit réaliser des *câbles artificiels*, qui

---

[1] Eric GERARD, *Leçons sur l'Électricité ;* t. I, chap. VII.

présentent une capacité et une résistance réparties de la même manière que dans les câbles sous-marins. Deux procédés sont en



Fig. 53.

usage pour former ces appareils. Le premier consiste à disposer en série des bobines de résistance calibrées, entre lesquelles sont échelonnés des condensateurs réunis en dérivation et produisant ainsi un effet de condensation analogue à celui qu'on observe avec les câbles (fig. 54).

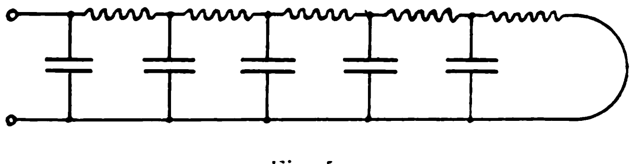


Fig. 54.

Le second moyen, imaginé par Muirhead, permet de répartir la capacité uniformément. L'une des armatures d'un condensateur est formée de feuilles d'étain, comme dans les condensateurs ordinaires. L'autre armature comporte des bandes d'étain disposées en zigzag et reliées en série de manière que leur résistance représente la résistance du câble. En constituant le diélectrique par une résine qui présente les mêmes effets de charge résiduelle que la gutta-percha, l'on peut étudier, à l'aide de ces câbles artificiels, tous les phénomènes observés dans les câbles sous-marins.

Étalons d'induction. — MM. Ayrton et Perry ont construit un étalon variable de self-induction en disposant à l'intérieur d'une bobine circulaire fixe une seconde bobine en série avec la

première et pivotant autour d'un axe diamétral, ce qui permet de faire varier l'angle des deux bobines entre les limites 0° et 180° (fig. 55). La self-induction du système est minima lorsque les bobines sont parallèles et parcourues par le courant en sens opposés. Lorsque la bobine mobile a fait un demi tour, l'inductance devient maxima. Une graduation empirique indique les valeurs

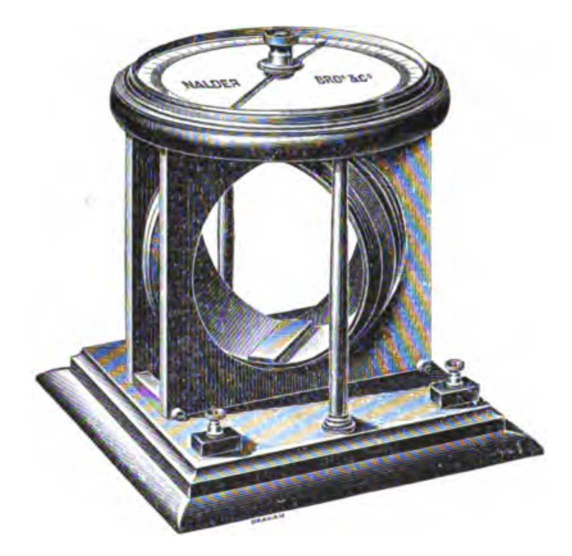


Fig. 55.

de la self-induction correspondant à des positions repérées. Les bobines sont enroulées sur des carcasses en bois qui, malgré tous les soins que le constructeur peut apporter à leur exécution, se déjettent à la longue en causant des variations du coefficient d'induction. D'un autre côté, la capacité des spires voisines doit être prise en considération dans les mesures où l'on fait usage de cet étalon. Les étalons de self-induction sont rarement supérieurs à 0,1 henry.

Chapitre V.

MATÉRIEL D'UN LABORATOIRE ÉLECTRIQUE.

Appareils. — Avant de décrire les instruments employés dans les essais électriques, nous donnerons quelques indications générales sur les dispositions à prendre dans les laboratoires. Les commençants feront bien d'étudier d'abord les méthodes générales de mesure, puis de s'exercer en déterminant les résistances des galvanomètres et des piles, au sujet desquelles nous entrerons dans des détails pratiques destinés à servir de guide au début. Après s'être familiarisé avec les mesures qui n'exigent que des tensions et des courants faibles, on peut aborder les essais des appareils qui utilisent des courants intenses.

Si l'on veut installer un laboratoire permettant des mesures très précises, il faut, autant que possible, l'établir à l'écart des champs magnétiques créés par les dynamos et des grandes masses de fer mobiles, afin que les appareils employés dans les essais ne soient pas influencés. Les câbles amenant des courants intenses dans le laboratoire seront tordus, de manière à neutraliser leurs actions électromagnétiques. On disposera d'une batterie d'accumulateurs assez puissante pour produire des courants constants, utilisés à l'étalonnage des appareils.

La détermination de l'intensité et de la différence de potentiel peut se faire, dans le cas des courants continus, d'une manière très

exacte, par le secours des galvanomètres à réflexion, gradués comme ampèremètres et comme voltmètres, et par les méthodes que nous décrirons, parmi lesquelles les méthodes d'opposition et les balances électrodynamiques sont les plus employées.

Un potentiomètre ou pont de compensation suffit pour tous les étalonnages relatifs aux courants continus, tandis que les balances électrodynamiques servent à graduer les appareils à courants alternatifs.

Pour les mesures courantes, les galvanomètres à réflexion les plus convenables sont ceux du type Deprez et d'Arsonval, sur lesquels les champs magnétiques extérieurs ont peu d'influence, de même que les variations du champ terrestre, et qui permettent des lectures rapides.

On réserve les galvanomètres à aimant mobile pour certaines mesures de résistances d'isolement, qui exigent une sensibilité exceptionnelle. Les appareils à aiguilles lourdes mobiles conviennent spécialement pour les mesures balistiques.

Lorsqu'on utilise des appareils à réflexion, il convient de les établir sur une base bien stable, ce qui n'est pas toujours facile à réaliser dans le voisinage des ateliers industriels. Si des consoles, fixées aux murs principaux du laboratoire, n'offrent pas une stabilité suffisante, on peut supporter les appareils à réflexion sur un bloc de pierre, épais de 15 à 25 cm, reposant par une saillie sur une masse de déchets de laine ou de coton empilés dans une caisse en bois ou en maçonnerie. Les vibrations du sol s'amortissent dans la laine et ne peuvent mettre en mouvement la masse de pierre supérieure.

Un autre moyen consiste à suspendre, par quatre fortes lanières de caoutchouc, quatre ressorts à boudin ou quatre chaînes, un bloc de pierre ou une épaisse plaque de plomb soutenant l'appareil qu'on doit soustraire aux vibrations. Celles-ci s'amortissent dans l'intermédiaire élastique ou discontinu. M. Julius a montré qu'on amortit les trépidations en supportant la cage de l'appareil par trois longs fils métalliques verticaux et en ayant soin de fixer à la cage des contrepoids que l'on règle de manière à amener le centre de gravité du système dans le plan horizontal passant par les points d'attache des fils. S'il persiste des vibrations horizontales, on les

amortit en fixant à la cage des ailettes plongeant dans des coupes contenant un liquide visqueux.

Dans les usines électriques, on est souvent obligé de se contenter d'appareils moins précis que les instruments à réflexion, par suite de la nécessité d'effectuer les mesures au milieu des machines. On se sert d'appareils à lecture directe, qui sont d'ailleurs à peu près les seuls utilisés pour les mesures effectuées sur les alternateurs et les transformateurs. Pour les courants continus, on choisit encore de préférence les appareils basés sur le principe du galvanomètre Deprez et d'Arsonval, afin de soustraire autant que possible les instruments à l'action des champs magnétiques extérieurs. Pour les hautes tensions, les voltmètres électrostatiques sont avantageux.

Les appareils à lecture directe doivent être fréquemment étalonnés. Les bons modèles sont susceptibles de donner, dans la région moyenne de leur échelle, une approximation de 0,5 pour 100, ce qui conduit à une erreur limitée à 1 pour 100 dans l'estimation de la puissance électrique déterminée par le produit des lectures de l'ampèremètre et du voltmètre. Cette exactitude est suffisante lorsqu'on essaie des dynamos conduites par des machines à vapeur dont les irrégularités exposent à des erreurs au moins aussi fortes. L'emploi des appareils à lecture directe est également justifié si l'on fait simultanément la mesure de la puissance mécanique en relevant des diagrammes d'indicateur, car l'évaluation de ces diagrammes entraîne des erreurs au moins du même ordre.

L'outillage d'un laboratoire est complété par des résistances et des piles étalons, des caisses de résistance, des condensateurs, des ponts de Wheatstone, des rhéostats capables de supporter des courants intenses et une collection de clefs de circuit.

Une bonne précaution consiste à enfermer les boîtes de résistance, ponts et appareils semblables dans des caisses dont le couvercle peut être enlevé au moment des essais. On évite ainsi les poussières et l'action de la lumière et de l'humidité sur les instruments.

Si les appareils sont destinés à des mesures d'isolement ou s'ils doivent être soumis à des potentiels très élevés, il faut les disposer sur des plaques d'ébonite, de gutta-percha ou de paraffine. Lorsque les instruments doivent être fixés aux tables, il est préférable de les

coller à l'aide de composition Chatterton, plutôt que d'employer des vis qui détruisent souvent l'isolement. Les batteries d'essai sont disposées sur des feuilles isolantes ou sur des isolateurs en porcelaine. Les fils de connexion sont isolés à la gutta-percha et soutenus par des rondelles en porcelaine ou passent dans des trous percés dans des plaques de paraffine. Les instruments et les clefs de circuit soumis à de hautes tensions doivent être nettoyés à l'aide d'un linge imbibé d'huile minérale, puis essuyés avec un linge sec, de façon à laisser une légère couche isolante sur les appareils. Pour les voltages élevés, on dispose les commutateurs de manière à pouvoir les manœuvrer par l'intermédiaire d'un manche en ébonite.

Commutateurs et clefs. — Les commutateurs et clefs sont des appareils accessoires d'un emploi très fréquent dans les mesures électriques. Ces appareils servent à combiner diversement différents circuits ou à relier entr'elles les parties d'un même circuit.

Il importe que la résistance électrique des contacts établis au moyen des commutateurs et des clefs soit aussi faible que possible. A ce point de vue, ces appareils peuvent être rangés dans les trois classes suivantes.

1. *Commutateurs à mercure.* Les différents fils à réunir plongent dans des godets remplis de mercure et les communications s'établissent d'un godet à l'autre au moyen de cavaliers en cuivre décapés au préalable et amalgamés aux extrémités.

Grâce à l'amalgamation, les liaisons sont aussi intimes que possible. On fait usage de godets en porcelaine disposés dans les trous d'une planchette en bois ou plus simplement d'une plaque de paraffine, dans laquelle on creuse des trous pour le mercure.

Dans les clefs suivantes, où le contact a lieu entre deux pièces métalliques solides, la résistance électrique des contacts est plus considérable que celle des contacts mercuriels; de plus, elle est très variable avec la pression exercée sur les pièces et l'état de la surface de ces dernières. Cependant, on les emploie de préférence aux commutateurs à mercure qui entraînent des pertes de ce métal et se salissent rapidement. Il faut avoir soin de ne jamais ouvrir un circuit où passe un courant intense par un commutateur à mercure, car il se produirait des projections mercurielles.

2. *Commutateurs à frottement.* Les commutateurs à frottement les plus employés sont le commutateur à manette, la clef à couteau et le commutateur à broches. Dans le premier, un levier métallique, manœuvré à l'aide d'une manette, peut tourner autour d'un axe; dans ce mouvement, le levier glisse en frottant sur une série de blocs en laiton disposés circulairement sur un support isolant en bois ou en ébonite. Ce dispositif permet de relier un fil aboutissant au levier successivement aux divers conducteurs attachés aux blocs. Afin d'éviter l'amenée du courant à la lame par le pivot même de son support, on fait appuyer une extrémité du levier sur un empâtement de ce dernier. Cet arrangement procure une surface de contact bien nette et soulage l'axe en équilibrant l'effort exercé par le grand bras du levier (fig. 56).

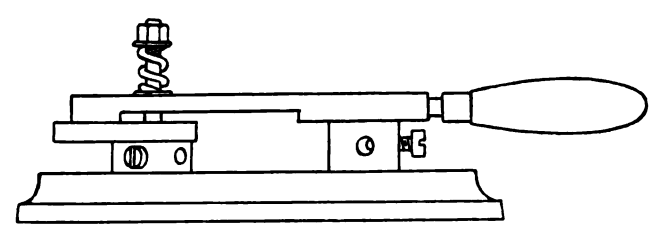


Fig. 56.

La clef à couteau comporte une lame de cuivre mobile autour d'une de ses extrémités et qu'on amène entre deux paires de mâchoires métalliques reliées aux conducteurs à mettre en com-



Fig. 57.

munication (fig. 57). Ce système, très employé pour les courants intenses, permet d'obtenir de larges surfaces de contact (5 mm² par

ampère) et de renouveler aisément les mâchoires altérées par les étincelles d'extra-courant. L'axe de rotation du levier ne fait pas partie du circuit électrique.

Le commutateur à broches permet de réunir les fils aboutissant à des blocs de laiton, par l'intermédiaire de fiches métalliques analogues à celles des boîtes de résistance.

3. *Commutateurs à pression.* Ils sont constitués par une lame métallique qu'on abaisse sur un buttoir pour fermer le circuit. Ces clefs demandent un certain entretien, à cause des étincelles qui, au moment de la rupture du courant, jaillissent entre les surfaces de contact et les oxydent. Bien que ces surfaces soient garnies de platine, les commutateurs de ce genre ne conviennent pas pour les courants intenses.

On peut classer les clefs comme suit d'après le rôle qu'elles jouent dans les circuits électriques. Pour assurer un isolement élevé, les clefs sont montées sur ébonite et les bornes d'attache sont portées par des colonnettes de même substance, afin de réduire autant que possible les dérivations de courant.

Les *clefs d'interruption ou interrupteurs* s'emploient pour ouvrir ou fermer à volonté un circuit. Une lame élastique pouvant être abaissée sur un buttoir résout le problème.

Les *clefs d'inversion ou inverseurs* servent à envoyer le courant d'une pile dans un circuit, tantôt dans un sens, tantôt en sens contraire.

Un modèle très employé est représenté schématiquement dans la fig. 58. Les extrémités du circuit sont reliées à deux lames élastiques en laiton durci, les deux pôles de la pile à deux traverses rigides situées l'une au dessous, l'autre au dessus des lames. Normalement ces dernières appuient contre la traverse supérieure; le circuit est ainsi fermé sur lui-même et la pile est isolée. En abaissant alternativement les lames, on envoie dans le circuit des courants de sens inverses. On peut maintenir les lames abaissées par des cames en ébonite. Il faut avoir soin de ne pas intervertir les connexions indiquées, sinon la pile serait mise en court-circuit par la traverse supérieure.

Les *clefs de décharge* sont destinées à provoquer la charge et la décharge, d'un condensateur. La clef de Sabine (fig. 59) comporte

une lame poussée vers le haut par un ressort et mobile entre deux traverses rigides. L'une des armatures du condensateur est reliée

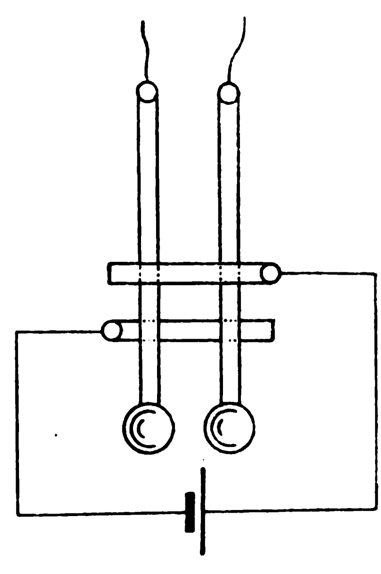


Fig. 58.

à la lame, tandis que l'autre communique avec la pile et le circuit de décharge connectés d'autre part respectivement à la traverse



Fig. 59.

inférieure et à la traverse supérieure. Grâce à deux becs portés par des leviers pivotant autour d'un même axe et situés à des hau-

teurs différentes, on peut soit isoler la lame, soit la mettre en communication avec la traverse inférieure. Si l'on dégage les becs, la lame revient contre la traverse supérieure sous l'action du ressort. L'abaissement de la lame détermine la charge du condensateur, la position moyenne correspond à l'isolement des armatures et le relèvement produit la décharge.

Chapitre VI.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE.

Classification des appareils utilisés à la mesure des courants. — Le plus grand nombre des mesures électriques comporte la détermination de l'intensité d'un courant ou la simple constatation du passage d'un courant; d'où l'importance des appareils destinés à la mesure des courants. Ces appareils sont basés sur l'un quelconque des effets du courant, à savoir :

l'*effet électromagnétique*, ou action d'un courant sur un aimant;

l'*effet électrodynamique*, ou action d'un courant sur un courant;

l'*effet chimique*, ou électrolyse ;

et, enfin, l'*effet thermique*, régi par la loi de Joule.

La mesure de la quantité d'électricité qui traverse un circuit est liée à celle de l'intensité du courant. Ainsi, le voltamètre permet d'estimer la quantité d'électricité et, par une simple division par le temps, fait connaître l'intensité moyenne du courant. Nous ne séparerons donc pas ces deux genres de mesures ; nous ne reporterons dans un chapitre spécial que les coulombmètres qui poursuivent un objectif tout particulier.

Description des galvanomètres à aimant fixe. — Nous étudierons, en première ligne, les galvanomètres qui utilisent l'action d'un aimant fixe sur une bobine mobile, appelée cadre galvanométrique

ou multiplicateur, parcourue par le courant à mesurer. Ces appareils ont reçu de nombreuses applications dans les laboratoires industriels. Le principe en a été indiqué par Maxwell, mais c'est à MM. Deprez et d'Arsonval qu'on doit la première forme pratique de ces instruments.

La fig. 60 représente un modèle simple, que l'auteur a étudié en vue d'en faciliter la construction par les élèves de l'Institut Montefiore. Une planchette verticale porte deux aimants en fer à cheval pourvus de pièces polaires concaves embrassant un noyau

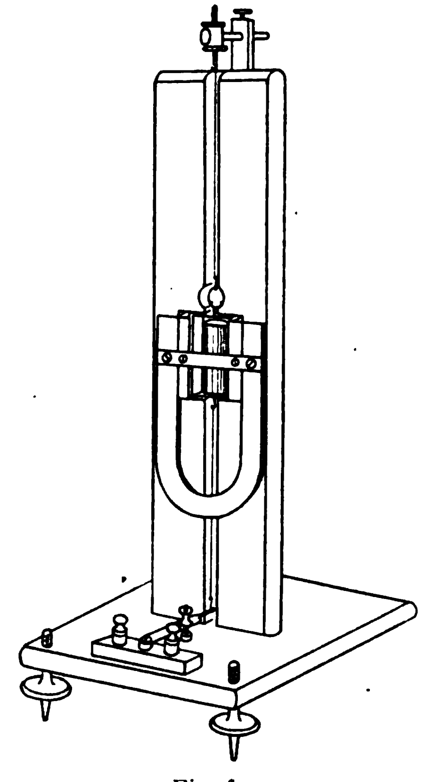


Fig. 60.

tubulaire. Celui-ci est destiné à ménager un entrefer cylindrique d'épaisseur constante à travers lequel les lignes de force rayonnent uniformément. Le flux magnétique est donc normal aux surfaces polaires dans l'entrefer; dans le noyau, il affecte la courbure de

celui-ci. Il est nécessaire d'arrondir les bords latéraux des pièces polaires pour éviter que les lignes de force ne s'y accumulent. Dans l'entrefer est suspendue une bobine entre deux fils métalliques droits qui lui amènent le courant. Il est à conseiller d'aplatir les fils de suspension afin de diminuer leur constante de torsion et de favoriser le rayonnement de la chaleur qui s'y développe par l'effet Joule. Les spires de la bobine sont empâtées dans du vernis à la gomme-laque afin de se soutenir sans déformation. Le fil de suspension supérieur aboutit à une tête de torsion. Le fil inférieur est fixé à une lame élastique réglable par le moyen d'une vis de pression, à l'aide de laquelle on peut faire varier la tension des fils et, par suite, la sensibilité de l'instrument. Ces fils, en bronze phosphoreux, mesurent 22 cm de longueur et 0,15 mm de diamètre avant l'aplatissement; leur résistance totale est de 1,5 ohm. Leurs extrémités sont soudées. Un miroir, fixé par des griffes, permet de faire les lectures par réflexion. Les pièces d'attache des fils de suspension, ainsi que les bornes de l'appareil sont montées sur des blocs en ébonite, le bois ne présentant pas une résistance d'isolement suffisante.

Dans le système précédent, le centre de gravité de l'équipage mobile n'est généralement pas situé sur l'axe des fils de suspension. Si celui-ci présente une légère obliquité par rapport à la verticale, le centre de gravité remonte quand la bobine tourne dans un sens, tandis qu'il descend pour un déplacement inverse; de là résultent, pour une même déviation, des couples directeurs parasites différant avec le sens de celle-ci. Pour éviter cet inconvénient et réduire la hauteur de la suspension, l'auteur a suspendu la bobine entre deux boudins de fil métallique. Le ressort supérieur est en bronze phosphoreux et fournit le couple directeur. Son axe est occupé par un fil de cocon qui supporte le poids du multiplicateur. Le ressort inférieur, en cuivre doux, ne sert qu'à conduire le courant; il doit être assez souple pour que le centre de gravité de la bobine se place sur le prolongement du fil de cocon.

La fig. 61 montre un tel appareil qui, dans sa forme primitive, ne présentait pas les pièces polaires courbes utilisées actuellement pour régulariser le champ magnétique. Les boudins adoptés ont 10 mm de diamètre et sont faits en fil de 0,15 mm. Le fil développé

mesure 1 m pour le boudin supérieur et 3 m pour le boudin inférieur, ce qui correspond à une résistance de 6 ohms.

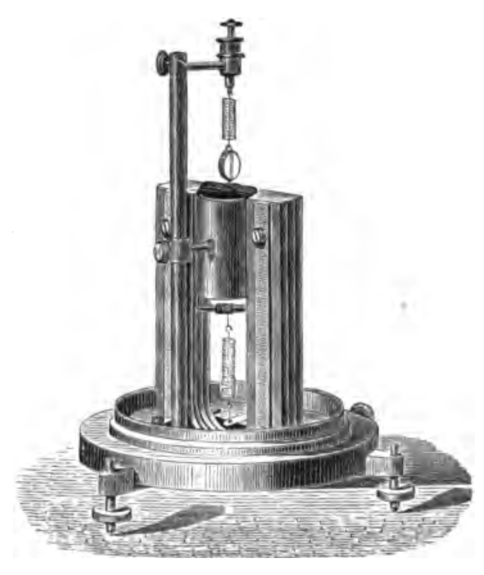


Fig. 61.

Ce mode de suspension donne au galvanomètre une grande sensibilité et évite les torsions permanentes qui subsistent après une déviation trop forte lorsqu'on emploie des fils droits de faible longueur.

En 1888, l'auteur, ayant à étudier des enregistreurs à bobines mobiles de très petites dimensions, a supprimé le noyau central et fait usage des pièces polaires plates et très rapprochées, laissant entre elles un champ magnétique sensiblement uniforme. MM. Ayrton et Mather ont employé, indépendamment, cette disposition qui conduit à des équipages mobiles très légers. La bobine de forme allongée est logée dans un tube en argent qui sert d'amortisseur, grâce aux courants développés par sa rotation dans le champ des aimants. Elle est suspendue, à un fil plat en bronze phosphoreux dont la section mesure 0,27 mm sur 0,05 mm, dans un autre tube de laiton fermé par une glace à l'endroit du miroir mobile. La bobine est reliée inférieurement à un boudin souple en bronze. Un ressort plat muni d'une vis de réglage permet de caler le tube d'argent dans le tube de laiton, pour empêcher le bris de

la suspension pendant le transport. Le tube de laiton se glisse entre les pôles de l'aimant et les connexions électriques s'établissent automatiquement par des ressorts. On peut ainsi changer facilement l'équipage mobile et le remplacer par un autre d'une résistance différente, suivant la nature des mesures à exécuter (fig. 62).



Fig. 62.

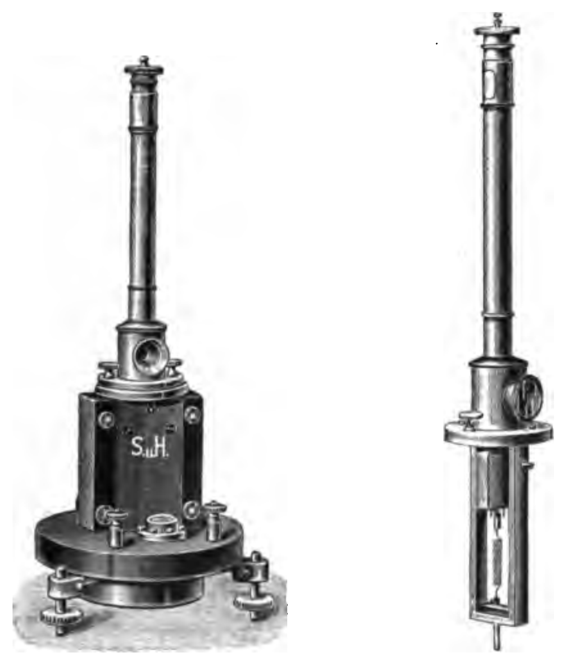


Fig. 63. Fig. 64.

Le modèle de galvanomètre construit par MM. Siemens et Halske, fig. 63 et 64, comporte un système inducteur de 6 aimants en fer à

cheval réunis par deux pièces polaires. Un noyau de fer placé à l'intérieur de la bobine augmente et régularise le champ, en même temps qu'il assure la proportionnalité du galvanomètre. La bobine très légère est en fil de cuivre. Sa hauteur est à sa largeur dans le rapport de 6 à 5. Le courant arrive au cadre par un fil de suspension plat en bronze phosphoreux; il en sort par un boudin en argent. La bobine galvanométrique est pourvue d'une carcasse en cuivre électrolytique, fendue à la base inférieure et dont le circuit est fermé par un fil métallique choisi de manière à assurer un amortissement convenable. Tout l'équipage mobile, ainsi que le noyau, peuvent être enlevés en une fois comme dans les galvanomètres Ayrton et Mather. Un dispositif spécial permet de caler la bobine pour le transport.

Théorie des galvanomètres à aimant fixe. — Lorsqu'un courant traverse le cadre mobile disposé parallèlement à la ligne des pôles de l'aimant, la bobine tend à se placer normalement à cette ligne, de manière à embrasser le plus grand nombre de lignes de force magnétique possible ; mais la torsion de la suspension exerce un couple antagoniste croissant avec l'angle de déviation.

Dans l'évaluation du moment du couple électromagnétique, il y a lieu de distinguer le cas des bobines à noyau, tournant dans un entrefer où le champ est radial, et le cas des bobines sans noyau, se mouvant dans un champ uniforme.

En appelant $\mathcal{H}$ l'intensité moyenne du champ dans lequel se déplacent les côtés verticaux de la bobine de hauteur h et de largeur l, i l'intensité du courant, n le nombre de spires du cadre, la force électromagnétique est $i\mathcal{H}nh$ dans le premier cas et, comme cette force est dirigée normalement au plan des spires de la bobine, le couple est $i\mathcal{H}nhl = i\mathcal{H}sn$, s étant la surface moyenne d'une spire. D'autre part, le moment du couple antagoniste peut, si la déviation est faible, être représenté par $c\alpha$, c étant la constante de torsion de la suspension.

L'angle d'équilibre satisfait à la condition

$$\mathcal{H}sni = c\alpha;$$

d'où

$$i = \frac{c\alpha}{\mathcal{H}sn} = A\alpha.$$

Le facteur $A = \frac{i}{\alpha}$ s'appelle *facteur de réduction du galvanomètre;* c'est le courant correspondant à l'unité d'angle.

Dans le cas des appareils à lecture par réflexion, on définit ordinairement sous le nom de *constante* le nombre de divisions de l'échelle correspondant à l'unité de courant. Pour ne pas avoir des nombres trop grands, on rapporte la constante au microampère quand on se sert de galvanomètres sensibles; il faut alors exprimer les résistances en mégohms ou les forces électromotrices en microvolts. La constante est l'inverse du facteur de réduction

$$k = \frac{1}{A}.$$

Il est nécessaire d'indiquer une fois pour toutes la longueur d'une division et la distance de l'échelle au miroir afin de permettre de calculer l'angle correspondant, donnée indispensable pour comparer entre elles les sensibilités d'appareils placés dans des conditions différentes.

Un autre moyen de comparaison consiste à indiquer la *formule de mérite* des galvanomètres, définie par le courant qui produit une déviation d'un millimètre sur une échelle située à 1 m de distance.

Dans la discussion des mesures faites avec les galvanomètres, il importe de bien préciser le sens donné à la constante. Dans les méthodes par comparaisons successives, la constante du galvanomètre s'élimine, de sorte qu'il n'y a aucun doute sur les unités à employer. Mais dans les méthodes de réduction à zéro, l'erreur de lecture $d\alpha$ correspond à une variation di du courant traversant le galvanomètre donnée par la relation

$$di = \frac{d\alpha}{k}.$$

Or, en général, i est exprimé par une force électromotrice en volts divisée par une résistance en ohms, de sorte que k est égal à 10^6 fois la constante définie par rapport au microampère.

La constante d'un galvanomètre mesure sa *sensibilité*. L'*exacti-*

tude de l'appareil, qu'il ne faut pas confondre avec la sensibilité, est, dans des conditions d'emploi déterminées, l'inverse de l'erreur relative de mesure, c'est à dire le rapport de la déviation totale à la plus petite déviation appréciable.

On détermine la constante par une expérience préalable, consistant à faire passer dans le galvanomètre un courant d'intensité connue i'; α' étant l'angle de déviation correspondant, on a

$$k = \frac{\alpha'}{i'}.$$

Dans le cas où la bobine est dépourvue de noyau et se meut dans un champ uniforme, dont les lignes de force sont des droites parallèles normales aux plans polaires en regard, le moment du couple électromagnétique est le produit de la force $i\mathcal{H}nh$ par le bras de levier du couple, qui est $l\cos\alpha$ attendu que la force est normale à la direction du champ.

On a donc

$$i\mathcal{H}sn\cos\alpha = c\alpha,$$

d'où

$$i = \frac{c}{\mathcal{H}sn}\,\frac{\alpha}{\cos\alpha}.$$

La complexité de cette fonction est la raison qui a engagé l'auteur à abandonner ce système. On ne peut négliger le paramètre $\cos\alpha$ que si l'on se sert de l'appareil entre des limites de déviation très restreintes. Il est toutefois possible d'étudier une courbure des pièces polaires propre à donner un champ dont la variation conpense les effets de l'obliquité de la bobine par rapport aux lignes de force.

Dans tous ces appareils, on doit donner aux aimants la plus grande puissance possible. Dans certains cas spéciaux, on a recours aux électro-aimants pour accroître l'intensité du champ et, partant, le couple électromagnétique. Mais il est difficile de maintenir l'intensité du champ invariable, par suite de l'hystérésis des noyaux.

Il convient d'approprier la résistance des galvanomètres à celle des circuits dans lesquels ils sont introduits. Il est facile de démontrer qu'on obtient la sensibilité maxima lorsque la résistance du galvanomètre est voisine de celle du circuit extérieur.

Supposons que le volume du cadre soit donné et négligeons les interstices entre les fils et l'espace occupé par l'isolant. En appelant r la résistance d'une spire unique, qui occuperait tout le volume disponible, la résistance est $R = n^2 r$, dans le cas de n spires. Pour une force électromotrice e et une résistance extérieure ρ, l'intensité du courant est exprimée par

$$i = \frac{e}{\rho + R} = \frac{e}{\rho + n^2 r}$$

et l'action électromagnétique est

$$\mathcal{H} sni = \frac{\mathcal{H} s n e}{\rho + n^2 r}.$$

Cette action est maxima pour

$$\rho = n^2 r.$$

Cette condition n'est jamais rigoureusement applicable, mais lorsqu'on disposera de plusieurs galvanomètres, on choisira celui dont la résistance concorde le mieux avec la résistance du circuit sur lequel on expérimente.

Lorsqu'on mesure les courants faibles qui passent dans les diélectriques, la résistance à donner aux bobines des galvanomètres doit être aussi grande que possible.

Il en est autrement si l'on se sert des galvanomètres pour mesurer de petites différences de potentiel : les fils de suspension doivent être aussi minces que possible pour réduire le couple de torsion et il est facile de démontrer que la résistance de la bobine doit être égale à celle des fils de support pour que l'effet électromagnétique soit maximum. Le raisonnement est le même que dans le cas précédent.

La conclusion est qu'un galvanomètre Deprez et d'Arsonval doit être muni de 2 équipages mobiles qui pourront avoir respectivement des résistances de 1 ohm et de 200 ohms, comme dans les appareils construits par M. Carpentier. Voici les sensibilités des équipages utilisés par ce constructeur :

	BOBINE DE 1 OHM	BOBINE DE 200 OHMS.
Intensité donnant 1 mm de déviation à 1 m de distance d'échelle.	0,00000847 amp.	0,000000435 amp.
Différence de potentiel donnant 1 mm à 1 m.	0,0000074 volt	0,0000857 volt

On a vu que, dans les appareils Ayrton et Mather et dans ceux de Siemens et Halske, l'équipage mobile peut s'enlever d'un bloc avec ses suspensions pour faciliter le remplacement.

Les galvanomètres à bobine mobile possèdent l'avantage précieux d'être peu influencés par les courants et les aimants voisins, dont les champs magnétiques sont faibles dans l'espace où se meut la bobine, comparés à celui des aimants inducteurs.

En outre, le mouvement de la bobine mobile peut être aisément amorti, grâce aux courants induits qui se développent dans celle-ci pendant son déplacement dans le champ des aimants. On est maître de varier le couple amortisseur, en modifiant la résistance du circuit relié à l'appareil. Comme cette résistance est souvent imposée par les conditions d'expérience, on réalise quelquefois un amortissement invariable en enroulant la bobine sur un cadre en aluminium sans soudure ou en plaçant la bobine dans un tube en cuivre ou en argent.

Pour les deux raisons que nous venons d'indiquer, l'usage des appareils à bobine mobile s'est rapidement répandu dans les laboratoires électrotechniques.

La forme à donner à la bobine n'est pas indifférente. A surface égale, la forme carrée est, parmi les formes rectangulaires, celle qui présente le périmètre minimum et qui procure le plus grand couple pour une résistance électrique déterminée. Par contre, une bobine carrée présente un moment d'inertie relativement grand, ce qui rend l'amortissement des oscillations plus difficile. Pour les emplois usuels, on cherche à rendre aussi grand que possible le rapport du moment du couple déviant, qui est proportionnel à la largeur de la bobine, au moment d'inertie, qui varie proportionnellement au

carré de cette dimension. On est donc amené à réduire autant que possible la largeur.

La mise en station du galvanomètre s'opère en observant les indications données à propos de la description des systèmes de lecture par réflexion. Pour éliminer les petites erreurs de réglage de l'échelle par rapport au miroir, on intervertit le sens du courant à mesurer de manière à obtenir des déviations α et α' de part et d'autre de la position d'équilibre. Si l'ajustement était parfait, on aurait $\alpha = \alpha'$. S'il y a une différence, la valeur véritable est $\frac{\alpha + \alpha'}{2}$.

Avant de se servir de l'appareil, il est nécessaire de s'assurer de la proportionnalité des déviations aux courants. Pour cela, on y fait passer des courants croissant dans un rapport connu. On construit un diagramme en portant en abscisses des valeurs proportionnelles aux courants et en ordonnées les déviations correspondantes. Si la proportionnalité existe, la ligne obtenue est une droite, lorsque l'échelle du galvanomètre est circulaire. Dans le cas contraire, la courbe empirique trouvée donne les corrections à apporter aux résultats d'observation. Dans les galvanomètres de faible résistance, les effets thermo-électriques produisent parfois des déviations gênantes. Il faut avoir soin d'employer le même métal pour toutes les parties du circuit, afin que les différences de température ne puissent pas donner lieu à des couples thermo-électriques.

Shunts. — Un galvanomètre construit pour mesurer des courants très faibles peut également servir à la détermination des courants intenses, si l'on dispose entre les bornes de l'appareil une résistance connue, ou *shunt*, qui absorbe la majeure partie du courant à évaluer.

Si g est la résistance du galvanomètre, s celle du shunt, I le courant total, le courant dans le galvanomètre a pour intensité

$$i = \mathrm{I}\frac{s}{s+g} = \frac{\alpha}{k},$$

d'où

$$\mathrm{I} = \frac{s+g}{s}\frac{\alpha}{k}.$$

Le rapport $\frac{s+g}{s} = m$ s'appelle *pouvoir multiplicateur* du shunt.

Pour que i soit égal au $^1/_{10}$, au $^1/_{100}$ ou au $^1/_{1000}$ de I, il faut que

s soit le $^1/_9$, le $^1/_{99}$ ou le $^1/_{999}$ de g. Les galvanomètres sont fréquemment pourvus d'une boîte de shunts contenant trois bobines ayant les résistances relatives indiquées.

L'adjonction du shunt a pour effet de diminuer la constante du galvanomètre shunté dans le rapport $\frac{s}{s+g}$. Il est à remarquer que la résistance entre les bornes du galvanomètre passe alors de g à

$$\frac{gs}{g+s} = \frac{g}{m}.$$

S'il est nécessaire de maintenir la résistance du circuit invariable, on ajoute une *résistance de compensation*, égale à

$$g - \frac{gs}{g+s} = \frac{g^2}{g+s} = g\frac{m-1}{m}.$$

Lorsque les courants à mesurer sont très intenses, on emploie comme shunt une barre ou mieux une bande métallique reliée au circuit par ses extrémités et sur laquelle on soude, en deux points intermédiaires, les deux fils allant au galvanomètre. Pour faire varier la constante de l'appareil ainsi shunté, l'on insère des résistances additionnelles en série avec le galvanomètre. Soit k' la constante du galvanomètre shunté, k étant celle du galvanomètre employé isolément. La résistance du shunt pouvant être négligée vis à vis de celle du galvanomètre, on a

$$k' = k \times \frac{s}{g}.$$

Si l'on ajoute une résistance r en série avec le galvanomètre, on obtient une nouvelle constante

$$k'' = k\frac{s}{g+r}.$$

En faisant varier r, on étend convenablement la limite des courants mesurables.

Si, par exemple, on dispose de résistances étalons de 1, 0,1, 0,01, 0,001 et 0,0001 ohm, en dérivant sur ces résistances un galvanomètre sensible en série avec des résistances variables, il ne sera pas difficile d'arriver à mesurer des courants variant de 0,001 à 10 000 ampères.

L'emploi d'un shunt exige que le rapport de la résistance de ce dernier à celle du galvanomètre reste invariable. Il faut donc que l'un et l'autre soient en même métal et placés dans les mêmes conditions de température. En outre, il faut que le courant n'échauffe pas sensiblement ces appareils, vu la difficulté d'obtenir des échauffements égaux. Afin d'éviter des corrections pour la température, on peut adopter des bobines de galvanomètre et des shunts en un alliage tel que le maillechort ou la manganine. Mais les grandes résistibilités de ces alliages ne permettent pas de réaliser des galvanomètres très sensibles.

Si la densité du courant qui traverse le shunt est considérable, on empêche une élévation anormale de température en plongeant l'appareil dans un bain d'huile minérale qu'on refroidit, au besoin, par une enveloppe extérieure d'eau ou de glace.

M. Ayrton conseille l'emploi, comme shunt, des résistances d'une boîte ordinaire graduée en ohms. Supposons que la résistance totale r de la boîte soit mise en circuit avec un galvanomètre de résistance g et que le courant I d'une pile se bifurque entre g et r. Le galvanomètre est traversé par un courant

$$i = I \frac{r}{r+g}.$$

Si, au lieu de réunir les fils d'amenée du courant aux extrémités de la résistance r, on les fixe à une résistance égale à 0,1 r prise dans la boîte, les attaches du galvanomètre restant invariables et le courant total étant maintenu constant grâce à une résistance de compensation, le courant dans l'instrument devient

$$i' = I \frac{0{,}1\, r}{0{,}1\, r + g + 0{,}9\, r} = 0{,}1\, i.$$

De même, si le shunt est 0,01 r, on a

$$i'' = 0{,}01\, i.$$

Suivant que les courants à mesurer sont faibles ou intenses, on emploiera, dans ce système, des boîtes à grandes résistances ou des résistances faibles telles que des bandes de manganine partagées en parties égales.

Détermination de la constante d'un galvanomètre à l'aide d'un couple étalon. — Lorsqu'un galvanomètre doit être employé à la mesure de courants faibles, seul ou avec des shunts de résistance connue, on détermine le nombre de divisions de l'échelle correspondant à un micro-ampère par l'un des procédés suivants.

Le galvanomètre est mis en circuit avec une pile étalon, telle qu'un élément Clark, et une résistance très élevée, 100 000 ohms par exemple.

Soient g la résistance du galvanomètre, ρ celle de l'élément, r la résistance additionnelle, i l'intensité du courant, e la force électromotrice de l'étalon et δ le nombre de divisions lu sur l'échelle :

$$i = \frac{e}{\rho + g + r} = \frac{\delta}{k},$$

d'où

$$k = \frac{\delta(\rho + g + r)}{e}.$$

Les résistances doivent être exprimées en mégohms, pour que le courant soit exprimé en micro-ampères. La résistance de l'élément et parfois même celle du galvanomètre peuvent être négli-

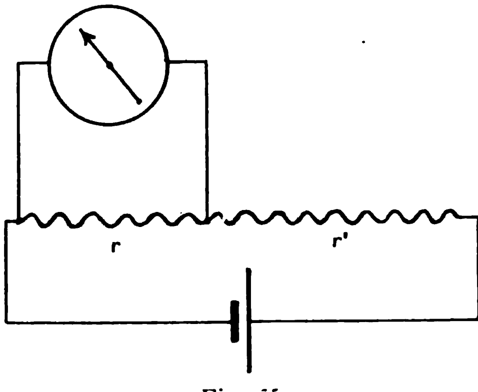


Fig. 65.

gées devant r. On cherche à obtenir la déviation la plus grande possible pour réduire au minimum l'erreur relative de lecture, égale à l'erreur relative sur la constante, qu'elle entraîne.

Lorsqu'on ne dispose que d'une boîte de résistance allant jusqu'à 10 000 ohms, on utilise un élément peu polarisable ou un élément

Clark de grandes dimensions. On dérive le galvanomètre sur une petite résistance r prise dans la boîte, en laissant en circuit avec la pile toutes les résistances disponibles r'. En désignant par i le courant dans le galvanomètre, par I le courant total, par e et ρ la force électromotrice et la résistance intérieure de l'élément,

$$i = \mathrm{I}\frac{r}{r+g} = \frac{e}{\rho + r' + \frac{rg}{r+g}} \times \frac{r}{r+g} = \frac{\delta}{k}.$$

Si r et ρ sont petits par rapport à g et r', on peut simplifier et écrire

$$i = \frac{e}{r'} \times \frac{r}{g} = \frac{\delta}{k}.$$

On choisira la résistance r de manière à obtenir la plus grande déviation δ possible et, suivant l'importance de l'erreur relative qu'on peut commettre dans la lecture du nombre de divisions, on appréciera ce qu'on peut négliger dans la formule.

La disposition qui vient d'être décrite est fréquemment employée pour obtenir une très faible différence de potentiel aux extrémités d'un galvanomètre ou d'un circuit.

Emploi du voltamètre pour le tarage des galvanomètres. — Lorsque les courants à mesurer sont de l'ordre d'un ampère, il est possible de graduer le galvanomètre pourvu de son shunt sans connaître la résistance du galvanomètre ni celle du shunt. On détermine la constante combinée du galvanomètre shunté en mesurant séparément l'intensité d'un courant au moyen du *voltamètre*. Il convient de remarquer que la valeur de l'ampère, définie par les lois de l'électrolyse, présente une incertitude d'environ 0,0005. Si 96540 coulombs correspondent au dépôt d'un équivalent en grammes des divers ions, l'équivalent électrochimique est 0,001115 gr. pour l'argent et 0,000326 gr. pour le cuivre.

Voltamètre à argent. Le voltamètre à argent est le plus précis lorsqu'il est employé avec les précautions suivantes.

La cathode est une capsule en platine d'au moins 10 cm de diamètre et de 4 à 5 cm de profondeur. L'anode est une plaque d'argent pur de 30 cm² de surface et de 2 à 3 mm d'épaisseur,

pour un courant d'un ampère ; elle est suspendue horizontalement dans l'électrolyte, près de la surface de celui-ci, par un fil de platine passant à travers des trous percés dans les coins de la plaque. Pour prévenir la chute sur la cathode de l'argent désagrégé de l'anode, celle-ci est enveloppée de papier à filtrer, maintenu par de la cire à cacheter. Le liquide doit consister en une solution neutre de nitrate d'argent contenant en poids 15 de nitrate pour 85 d'eau.

La résistance du voltamètre varie pendant la durée du passage du courant. En vue d'éviter que ces changements n'exercent un effet trop accentué sur le courant, il est utile d'ajouter dans le circuit une résistance additionnelle, de manière que la résistance totale ne soit pas inférieure à 10 ohms.

Pour préparer l'expérience, on commence par laver la capsule de platine à l'acide nitrique, puis à l'eau distillée; on la sèche à chaud et on la laisse refroidir dans un dessicateur avant de la peser. La capsule est alors remplie de la solution de nitrate et placée sur un support en cuivre isolé et pourvu d'une borne. L'anode est immergée dans le liquide. On ferme le circuit à l'aide d'une clef et l'on note l'heure de l'établissement du contact. Le courant est maintenu pendant une demi-heure au moins. La solution est alors retirée et la capsule lavée à l'eau distillée et à l'alcool; on sèche le récipient dans une étuve à air, à la température d'environ 160° C. Après refroidissement dans un dessicateur, on pèse de nouveau. La différence des poids, en grammes, représente l'argent déposé; divisée par le nombre de secondes durant lesquelles le courant a passé et par 0,001115, elle exprime l'intensité moyenne en ampères.

Le courant doit être maintenu aussi constant que possible à l'aide de la résistance additionnelle, et la lecture du galvanomètre faite à des intervalles de temps rapprochés. Ces observations fournissent les éléments d'une courbe qui permet de déterminer la déviation correspondant au courant moyen.

Voltamètre à cuivre. Pour la graduation des galvanomètres industriels, le voltamètre à cuivre est préféré au voltamètre à argent, parce que les substances employées sont moins chères et que la manipulation est plus commode.

La solution doit contenir du sulfate de cuivre purifié du commerce, à une densité comprise entre 1,10 et 1,15. Le liquide est additionné de 5 pour 100 d'acide sulfurique. La présence de cet acide empêche l'altération des électrodes en cuivre qui se dissolvent à la longue dans la solution neutre. Dans le même but, on peut remplacer l'acide sulfurique par 5 pour 100 d'alcool.

Les électrodes en cuivre électrolytique doivent être découpées avec des appendices pour permettre la fixation aux attaches et avoir au moins 0,5 mm d'épaisseur. On fixe ces électrodes à des pinces à ressort disposées de manière qu'on puisse régler la surface immergée et détacher facilement les plaques pour la pesée. Les bords des plaques sont arrondis pour éviter la formation de dépôts peu adhérents sur les arêtes. Les plaques sont décapées dans l'eau acidulée d'acide nitrique, puis dans une solution d'acide sulfurique; on les rince alors dans l'eau distillée et dans l'alcool. On les pèse après les avoir desséchées dans un dessicateur. Il faut éviter de toucher avec les doigts les parties à immerger, de crainte de nuire au dépôt. La densité du courant doit être d'environ 1 ampère par dm^2 de cathode. Si le courant est trop intense, le dépôt devient cristallin et peu adhérent. Le courant est réglé à l'aide d'un rhéostat. L'opération dure de 30 minutes à 1 heure. Lorsqu'on retire les électrodes, on les lave à l'eau légèrement acidulée d'acide sulfurique pour éviter l'oxydation, puis à l'alcool; on sèche et l'on repèse la cathode. Le calcul se fait comme dans le procédé précédent, en adoptant 0,000326 pour l'équivalent électrochimique du cuivre.

Étude balistique du galvanomètre à aimant fixe et à champ radial. Mesure d'une décharge instantanée. — Le voltamètre fournit le moyen de mesurer une quantité d'électricité qui s'écoule sous forme de courant constant. Si la quantité d'électricité passe brusquement, comme c'est le cas dans la décharge d'un condensateur ou l'extra-courant d'une bobine, la méthode est en défaut. On fait alors passer le courant instantané dans un galvanomètre et l'impulsion de l'équipage mobile, mesurée par l'élongation lue sur l'échelle, permet d'évaluer la quantité d'électricité écoulée.

Avant d'exposer la méthode, il est nécessaire de faire brièvement l'étude des oscillations d'un galvanomètre soumis à l'action d'un couple déviant tel que celui produit par un courant instantané.

L'équation du mouvement s'obtient en appliquant le théorème de mécanique rationnelle suivant lequel la dérivée par rapport au temps de la somme des moments des quantités de mouvement du système mobile est égale à la somme des moments des couples agissants

$$\frac{d}{dt} \Sigma\, m v r = \Sigma\, C.$$

Mais $v = \omega r$ et $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$, α étant l'angle de déviation du cadre à un moment quelconque. En appelant I le moment d'inertie de l'équipage mobile, on a donc

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \Sigma\, C.$$

Parmi les couples agissants figurent :

1° le couple accélérateur, qui, pour une valeur momentanée i du courant, est $\mathcal{H}sni$;

2° le couple retardateur, développé par le fil de suspension. Ce couple est proportionnel à l'angle de torsion α, et peut être représenté par $c\alpha$;

3° les couples amortisseurs, dus au frottement du cadre contre l'air et aux courants induits qui se développent dans le système mobile par sa rotation dans le champ inducteur. Les frottements s'annulent avec la vitesse; ils peuvent être considérés comme proportionnels à celle-ci et, par suite, le couple correspondant peut être représenté par $f \frac{d\alpha}{dt}$.

Pour trouver l'expression de l'amortissement occasionné par les courants induits, on remarquera que la force électromotrice d'induction, due à la vitesse angulaire $\frac{d\alpha}{dt}$, est $\mathcal{H}sn \frac{d\alpha}{dt}$; en représentant par R la résistance du circuit et en négligeant la force contre-électromotrice très minime due à la self-induction du cadre, on a donc, pour la valeur du courant induit,

$$i_1 = \frac{\mathcal{H}\, s\, n}{R} \frac{d\alpha}{dt}.$$

Le couple dû à ce courant est

$$\mathcal{H}\, s\, n\, i_1 = \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{R} \frac{d\alpha}{dt}.$$

L'équation du mouvement devient ainsi, en faisant passer les couples antagonistes dans le premier membre,

$$\mathrm{I}\frac{d^2\alpha}{dt^2}+\left(f+\frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{\mathrm{R}}\right)\frac{d\alpha}{dt}+c\alpha=\mathcal{H}\,s\,n\,i. \qquad (1)$$

Si l'on admet que le moment d'inertie du système mobile est suffisant pour que, pendant la durée τ, supposée très courte, du passage du courant, le cadre mobile ne se déplace pas d'une manière sensible, α est nul à la fin du temps τ; de sorte qu'en intégrant l'équation entre o et τ, après en avoir multiplié les termes par dt, il vient

$$\mathrm{I}\frac{d\alpha}{dt}=\mathcal{H}\,s\,n\int_o^\tau i\,dt=\mathcal{H}\,s\,n\,q,$$

q désignant la quantité d'électricité qui a traversé le cadre galvanométrique.

Un grand moment d'inertie est d'ailleurs utile pour ralentir l'oscillation et amener un arrêt relatif à la fin de celle-ci.

Après le temps τ, le second membre de (1) s'annule et l'équation du mouvement devient

$$\mathrm{I}\frac{d^2\alpha}{dt^2}+\left(f+\frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{\mathrm{R}}\right)\frac{d\alpha}{dt}+c\alpha=o.$$

Elle est de la forme

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2}+2a\frac{d\alpha}{dt}+b^2\alpha=o$$

si l'on pose

$$a=\frac{f}{2\,\mathrm{I}}+\frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2\,\mathrm{R}\,\mathrm{I}}$$

$$b=\sqrt{\frac{c}{\mathrm{I}}}.$$

C'est une équation linéaire sans second membre, qui est susceptible de donner des solutions de formes différentes, suivant que l'on a $a>b$ ou $a<b$.

Dans le premier cas, la solution générale est

$$\alpha=e^{-at}\left(\mathrm{A}\,e^{t\sqrt{a^2-b^2}}+\mathrm{B}\,e^{-t\sqrt{a^2-b^2}}\right)$$

et, dans le deuxième cas,

$$\alpha = e^{-at}\left(A \cos t\sqrt{b^2 - a^2} + B \sin t\sqrt{b^2 - a^2}\right).$$

Les facteurs A et B sont, dans les deux cas, des constantes d'intégration.

La première solution montre que le galvanomètre revient à sa position d'équilibre sans osciller; alors le mouvement est dit *apériodique*. Dans le deuxième cas, le système mobile effectue des oscillations d'amplitude décroissante avant de revenir au repos; le mouvement est *périodique*.

En posant $\sqrt{b^2 - a^2} = \rho$, on peut écrire

$$\alpha = e^{-at}(A \cos t\rho + B \sin t\rho),$$

d'où

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-at}\left\{(B\rho - Aa) \cos t\rho - (aB + \rho A) \sin t\rho\right\}.$$

Pour déterminer les constantes A et B, il suffit d'introduire dans les deux équations précédentes, les conditions initiales du mouvement, à savoir $t = o$, $\alpha = o$ et

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\mathcal{H} s n q}{I}.$$

On déduit de là

$$o = A$$

$$\frac{\mathcal{H} s n q}{I} = B\rho$$

En remplaçant A et B par leurs valeurs, on trouve pour α et $\frac{d\alpha}{dt}$ les expressions

$$\alpha = e^{-at}\,\frac{\mathcal{H} s n q}{I\rho} \sin t\rho$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-at}\left(\frac{\mathcal{H} s n q}{I} \cos t\rho - \frac{a \mathcal{H} s n q}{I\rho} \sin t\rho\right).$$

La vitesse angulaire $\frac{d\alpha}{dt}$ du système mobile s'annule au temps t pour lequel

$$\frac{\mathcal{H} s n q}{I} \cos t\rho = \frac{a \mathcal{H} s n q}{I \rho} \sin t\rho$$

ou

$$\text{tang } t\rho = \frac{\rho}{a}.$$

De là on tire

$$\sin t\rho = \frac{\rho}{\sqrt{a^2 + \rho^2}}.$$

Par suite, la première élongation est donnée par la valeur de α dans laquelle on fait

$$t_1 = \frac{1}{\rho} \text{ arc tang } \frac{\rho}{a} ;$$

on obtient

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{H} s n q}{I \rho} \frac{\rho}{\sqrt{a^2 + \rho^2}} e^{-\frac{a}{\rho} \text{ arc tang } \frac{\rho}{a}}.$$

La vitesse angulaire s'annule encore lorsque

$$\text{tang } t_2 \rho = \text{tang } (\pi + t_1 \rho)$$

c'est à dire pour

$$t_2 = \frac{\pi}{\rho} + t_1$$

et, d'une manière générale, pour

$$t_n = \frac{\pi}{\rho} + t_{n-1}.$$

On déduit de là, en additionnant les n valeurs de t,

$$t_n = \frac{\pi}{\rho} (n - 1) + t_1.$$

La n^e élongation a pour amplitude

$$\alpha_n = e^{-at_n} \frac{\mathcal{K} s n q}{I \rho} \sin \left\{ \pi (n-1) + t_1 \rho \right\}$$

$$= \alpha_1 e^{-a(n-1)\frac{\pi}{\rho}}.$$

Ces résultats montrent que le mouvement du cadre est isochrone, la durée d'une demi-oscillation étant $\frac{\pi}{\rho} = T$.

L'amplitude des oscillations décroît suivant les termes d'une progression géométrique dont la raison est e^{-aT}.

L'exposant $\lambda = aT$, pris positivement, s'appelle le ***décrément logarithmique*** des oscillations, parce qu'il est le logarithme népérien du rapport des amplitudes de deux oscillations successives ; en effet

$$\lambda = \log_e \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}.$$

On peut exprimer les coefficients a et b en fonction des valeurs λ et T qui résultent directement de l'observation.

On a, en effet,

$$a = \frac{\lambda}{T} = \frac{f}{2I} + \frac{\mathcal{K}^2 s^2 n^2}{2IR}$$

$$b = \frac{1}{T}\sqrt{\lambda^2 + \pi^2} = \sqrt{\frac{c}{I}}$$

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{K} s n q}{I} \frac{T}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} e^{-\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}}.$$

Dans le cas particulier où les couples amortisseurs sont nuls, $a = o$ et $\lambda = o$. La durée d'une demi-oscillation est alors

$$T_0 = \frac{\pi}{b}$$

d'où

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2}}.$$

On peut écrire, dans le cas où le mouvement est amorti,

$$\alpha_1 = \frac{\mathcal{H}snq}{I}\frac{T_0}{\pi}\,e^{-\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tang}\frac{\pi}{\lambda}}.$$

On déduit de ce qui précède la mesure de la quantité d'électricité qui s'est écoulée dans la décharge instantanée

$$q = \frac{I}{\mathcal{H}sn}\frac{\pi}{T_0}\,\alpha_1\,e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tang}\frac{\pi}{\lambda}}. \quad (2)$$

Si l'amortissement est pratiquement nul, ce qui est le cas lorsque le galvanomètre est placé sans shunt dans le circuit d'un condensateur et que la résistance de l'air est très petite, on a simplement

$$q = \frac{I}{\mathcal{H}sn}\frac{\pi}{T_0}\alpha_1.$$

Si l'amortissement est faible, on ne commet pas d'erreur sensible en admettant que les oscillations décroissent suivant les termes d'une progression arithmétique, c'est à dire qu'entre les lectures consécutives α_1 et α_3 relevées du même côté du zéro, il y a 4 demi-oscillations simples dont les amplitudes successives diffèrent entre elles d'intervalles angulaires égaux à $\frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}$. Il en résulte que l'élongation première, corrigée de l'amortissement, est alors

$$\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}.$$

Dans ce cas, on a

$$q = \frac{I}{\mathcal{H}sn}\frac{\pi}{T_0}\left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}\right).$$

Constante balistique. Coefficient de sensibilité du galvano mètre. — Dans l'expression générale (2), qui peut être mise sous la forme

$$q = \frac{1}{K}\alpha_1\,e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arctg}\frac{\pi}{\lambda}},$$

le facteur K, qui représente la déviation en radiants pour l'unité

électromagnétique de quantité, s'appelle la *constante balistique* du galvanomètre par opposition à la constante pour le courant permanent, définie par

$$i = \frac{c\,\delta}{\mathcal{H} s n} = \frac{\delta}{k},$$

d'où

$$k = \frac{\mathcal{H} s n}{c} = \frac{\mathcal{H} s n}{\mathrm{I}} \frac{\mathrm{T}_0^2}{\pi^2}.$$

Cette équation permet d'éliminer de l'équation (2) le facteur $\frac{\mathrm{I}}{\mathcal{H} s n}$, généralement inconnu. On a

$$q = \frac{\mathrm{T}_0}{\pi} \frac{i}{\delta} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}} = \frac{\mathrm{T}}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} \frac{1}{k} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}}$$

$$= \frac{1}{\mathrm{K}} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda}}. \qquad (3)$$

Par la comparaison des dernières équations, on trouve, entre la constante balistique et la constante permanente d'un même galvanomètre, la relation curieuse

$$\frac{\mathrm{K}}{k} = \frac{\pi}{\mathrm{T}_0} = \frac{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}}{\mathrm{T}}.$$

Si k se rapporte au micro-ampère, K est relatif au microcoulomb.

Ce résultat permet de déduire la constante balistique de la constante permanente, de l'observation de la durée d'une oscillation et du décrément logarithmique.

Pour estimer la durée d'une oscillation simple, on lance dans le galvanomètre la décharge d'un condensateur et l'on fait partir un compte-secondes lors du premier passage de la bobine par la position d'équilibre ou par l'une des positions extrêmes ; on compte le nombre d'oscillations simples ou le nombre d'oscillations doubles et l'on arrête le compte-secondes après 5, 10 ou 20 oscillations, suivant la rapidité de celles-ci

Pour obtenir le décrément logarithmique, on note les lectures correspondant à des séries de 5, 10, 20 oscillations complètes. Le décrément est le logarithme népérien du rapport des déviations extrêmes, divisé par le nombre d'oscillations observées. De T et λ on déduit la période d'oscillation T_0 sans amortissement.

Enfin, si l'on désire déterminer le moment d'inertie du système mobile, on adjoint à l'équipage du galvanomètre une masse, telle qu'un balancier portant deux contrepoids, dont le moment d'inertie I' est calculable. En faisant osciller le cadre seul, on avait

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{I}{c}};$$

avec la masse supplémentaire, on obtient

$$T_0' = \pi \sqrt{\frac{I + I'}{c}},$$

d'où

$$I = \frac{T_0^2}{T_0'^2 - T_0^2} I'.$$

En général, on détermine directement la constante balistique en envoyant, dans le galvanomètre, la décharge d'un condensateur de capacité connue chargé à l'aide d'une pile étalon ou la quantité d'électricité induite dans une bobine entourant un long solénoïde dont on interrompt le courant. Dans ce dernier cas, en désignant par n_1 le nombre de spires du solénoïde par cm, par s la section d'une spire, par i l'intensité du courant inducteur, et par n le nombre de tours de fil de la bobine reliée au galvanomètre dont le circuit, avec ses connexions, a une résistance R,

$$q = \frac{4\pi n_1 i s n}{R} = \frac{\alpha}{K},$$

en supposant l'amortissement négligeable. Si le même courant i est mesuré dans le galvanomètre par $i = \frac{\delta}{k}$, on a

$$K = \frac{\alpha k R}{4\pi n_1 n s \delta}.$$

Le plus souvent on compare les galvanomètres entre eux d'après

les constantes permanentes ou les constantes balistiques et sans s'occuper de la rapidité des lectures, qui est cependant un élément important au point de vue de l'usage de ces appareils et qui dépend de la période d'oscillation du cadre. Pour en tenir compte, M. Armagnat propose d'appeler *coefficient de sensibilité* d'un galvanomètre à miroir la déviation produite par un courant de 1 micro-ampère, l'échelle étant placée à une distance du miroir égale à la longueur de 1 000 de ses divisions et la durée d'oscillation du système mobile étant de 1 seconde sans amortissement. La formule

$$k = \frac{\mathcal{H}sn}{\mathrm{I}} \frac{\mathrm{T}_0^2}{\pi^2}$$

permet de ramener les constantes à une même période.

Résistance critique. — Si l'on fait osciller un galvanomètre Deprez et d'Arsonval pourvu d'un shunt, le mouvement reste périodique tant que la résistance du shunt est suffisante pour que les courants induits ne déterminent pas un amortissement trop considérable. Lorsque le shunt décroît, le décrément logarithmique augmente. Il arrive un moment où la seconde élongation est nulle. Ce cas correspond à la condition $a = b$, soit

$$\frac{f}{2\mathrm{I}} + \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2\mathrm{R}\mathrm{I}} = \sqrt{\frac{c}{\mathrm{I}}}.$$

Dans ces conditions, l'amortissement dû à la résistance de l'air peut être négligé devant l'amortissement dû au couple électromagnétique. On a donc

$$\mathrm{R} = \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2\mathrm{I}} \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{c}} = \frac{\mathcal{H}^2 s^2 n^2}{2\mathrm{I}} \frac{\mathrm{T}_0}{\pi},$$

valeur qui représente la résistance critique du circuit galvanométrique, correspondant à la cessation des oscillations périodiques de l'équipage mobile. A l'aide de cette relation, on peut vérifier les résultats obtenus pour $\mathcal{H}sn$ et c d'après les observations de T, λ et I.

Influence de la durée de la décharge. — La théorie qui précède suppose que la décharge qui traverse le galvanomètre a une durée négligeable devant la période d'oscillation de l'instrument. S'il

n'en est pas ainsi, l'élongation commence avant la fin de la décharge et diffère de la valeur trouvée précédemment d'une quantité variable avec le rapport $\frac{T}{\tau}$. Les différences peuvent être trouvées expérimentalement en déchargeant un condensateur dans un galvanomètre dont on connaît la période T à circuit ouvert. En variant la résistance du circuit, on peut obtenir des durées de décharge calculables par la formule

$$\tau = CR \log_e \frac{1}{n},$$

C étant la capacité du condensateur, R la résistance du circuit de décharge et n la fraction de la charge primitive qui reste après le temps τ (¹). En admettant que cette fraction est $^1/_{100}$ et en négligeant la charge résiduelle, M. Ledeboer (²) a trouvé, avec un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, une différence de 15 pour 100 quand la durée de la décharge équivaut à la durée d'une oscillation du cadre, de 5 pour 100 lorsque la durée de la décharge est la moitié de celle d'une oscillation et de 1 pour 100 quand le rapport $\frac{T}{\tau} = 5$.

Répétition de la décharge pour obtenir une élongation renforcée. — Il est possible, en répétant périodiquement la décharge au moment où le cadre mobile repasse par la position d'équilibre, d'obtenir une élongation renforcée, dont on peut déduire la quantité d'électricité correspondant à une décharge.

Supposons que ω soit la vitesse angulaire initiale communiquée au cadre par la première décharge. Au moment où le système oscillant repasse par cette position après avoir accompli une oscillation complète, la vitesse angulaire est affaiblie. Elle peut être représentée par $m\omega$, m étant un coefficient d'autant plus petit que l'amortissement est plus grand. Si, à l'instant considéré, on lance dans le cadre une nouvelle décharge, la vitesse angulaire

(¹) Eric Gerard, *Leçons sur l'Electricité;* chap. IX, t. I.
(²) Ledeboer, *Lum. Electr.;* 26 juin 1886.

nouvelle est $\omega + m\,\omega = \omega\,(1 + m)$. En répétant une seconde fois cette opération, on obtient $\omega\,(1 + m + m^2)$. Si l'on continue de même, la vitesse tend vers une limite

$$\omega\,(1 + m + m^2 + \ldots.) = \frac{\omega}{1 - m}.$$

Si $m = 0{,}90$, l'élongation limite est décuple de la première.

Mesure d'une décharge électrique à l'aide d'un galvanomètre pourvu d'un shunt — Si la quantité d'électricité transportée par la décharge occasionne une élongation sortant des limites de l'échelle, il est nécessaire de disposer un shunt entre les bornes du galvanomètre. Désignons par $\mathcal{L}$ le coefficient de self-induction du cadre mobile et supposons nuls celui du shunt et le coefficient d'induction mutuelle du shunt et du galvanomètre. En appelant I l'intensité du courant de décharge à un moment quelconque, *i et i'* les courants dérivés dans le galvanomètre et dans le shunt, on a, en vertu des lois de Kirchhoff,

$$I = i + i'$$

$$ig - i's = -\mathcal{L}\,\frac{di}{dt}.$$

Pour résoudre ces équations, deux cas sont à considérer :

1° La bobine mobile ne se déplace pas pendant la durée τ de la décharge. On a alors, en multipliant les deux équations par dt, en intégrant entre les limites de temps o et τ de la décharge et en appelant Q, q, q' les quantités d'électricité de la décharge totale, de la décharge dans le galvanomètre et de celle qui traverse le shunt,

$$Q = q + q'$$

$$gq - sq' = -\mathcal{L}\int_{i=o}^{i=o} di = o,$$

attendu que le courant est nul au commencement et à la fin de la décharge.

Il résulte de ce qui précède qu'alors

$$q = Q\,\frac{s}{s + g}.$$

c'est à dire que le partage se fait comme dans le cas des courants permanents.

2° Si la bobine se déplace pendant la décharge, il faut faire entrer en ligne de compte la force électromotrice due au flux magnétique coupé par la bobine mobile pendant ce déplacement initial. Il semble naturel d'admettre que ce flux est proportionnel à l'élongation finale, c'est à dire que l'angle β décrit pendant le temps τ est proportionnel à l'élongation α. Le nombre de lignes de force coupées pendant le temps τ peut alors être figuré par

$$\mathfrak{N} = A\beta = B\alpha.$$

Dans ce cas, la seconde loi de Kirchhoff donne

$$ig - i's = -\mathfrak{L}\frac{di}{dt} - \frac{d\mathfrak{N}}{dt} = -\mathfrak{L}\frac{di}{dt} - A\frac{d\beta}{dt}.$$

En multipliant par dt et en intégrant, il vient

$$\int_0^\tau i\,g\,dt - \int_0^\tau i's\,dt = -\mathfrak{L}\int_{i=0}^{i=0} di - A\int_0^\beta d\beta,$$

ou, vu que la répartition de la décharge est différente de celle alculée dans le premier cas,

$$g\,q_1 - s\,q'_1 = -A\beta = -B\,\alpha = -M\,q_1,$$

car q_1 est proportionnel à α.

Par suite

$$\frac{q_1}{q'_1} = \frac{s}{g+M}.$$

et

$$\frac{q_1}{Q} = \frac{s}{s+g+M}.$$

L'influence du shunt équivaut donc, dans ce cas, a un accroissement apparent de la résistance du galvanomètre. Cet accroissement M doit être déterminé expérimentalement pour diverses valeurs du shunt, car l'observation montre qu'il ne peut être considéré comme constant qu'entre des limites assez restreintes. Pour la détermination de M, on considère les premières élongations, en tenant compte de l'amortissement.

Lorsqu'on décharge un condensateur dans un galvanomètre shunté suivant la méthode de M. Ayrton, l'amortissement est indépendant du fractionnement du courant de décharge, attendu que le circuit du galvanomètre conserve une résistance invariable.

Chapitre VII.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE.

Galvanomètres des tangentes. — L'intensité du champ magnétique au centre d'un cadre circulaire pourvu d'une bobine de fil dont les n spires sont rapprochées comparativement à la longueur r du rayon du cadre, est

$$\frac{2 \pi n i}{r}$$

lorsqu'un courant d'intensité i parcourt la bobine.

Si l'on oriente le cadre dans le méridien magnétique et si l'on suspend au centre une aiguille de très petites dimensions, de moment magnétique $\mathcal{A}$, l'aiguille dévie d'un angle α déterminé par l'égalité des couples dûs au champ magnétique terrestre, dont l'intensité horizontale est $\mathcal{H}$, et à l'action du courant

$$\frac{2 \pi n i}{r} \mathcal{A} \cos \alpha = \mathcal{H} \mathcal{A} \sin \alpha,$$

d'où

$$i = \frac{\mathcal{H}\, r}{2 \pi n} \operatorname{tang} \alpha.$$

Si les facteurs du second membre sont exprimés en unités C. G. S., l'intensité est donnée en ampères par la formule

$$i = \frac{5\, \mathcal{H}\, r}{\pi n} \operatorname{tang} \alpha.$$

L'intensité horizontale du champ terrestre est fournie par une mesure indépendante ou par les tables magnétiques. Si l'on se sert

du nombre $\mathcal{H}$ pris dans des tables, au lieu de déterminer sur place l'intensité du champ, il faut installer le galvanomètre dans



Fig. 66.

un local dépourvu d'aimants et de courants qui pourraient modifier les constantes magnétiques.

Il faut veiller à ce que, dans la construction du galvanomètre lui-même, il n'entre pas de corps magnétiques. Les champs parasites limitent beaucoup l'emploi du galvanomètre des tangentes pour les mesures industrielles.

Dans les mesures précises, divers facteurs de correction doivent intervenir pour tenir compte de l'écartement des spires et de la longueur de l'aiguille.

La correction due à l'écartement des spires est la moins importante. Elle peut même être éliminée si l'on adopte une bobine de section rectangulaire présentant une longueur suivant l'axe égale à l'épaisseur de l'enroulement multipliée par 0,8. Si la longueur est égale à l'épaisseur et si ces deux dimensions mesurent le dixième du rayon de la bobine, l'erreur atteint seulement 0,05 pour 100.

L'erreur causée par la longueur de l'aiguille ne dépasse pas 0,5 pour 100, si cette longueur n'est pas supérieure au vingtième du rayon du cadre. L'erreur est nulle pour une déviation de 26° environ.

On a vu d'autre part qu'une mesure faite au galvanomètre des tangentes présente l'erreur relative minima lorsque la déviation est voisine de 45°. Lorsqu'on fait des lectures directes, on règle les expériences de manière à obtenir des déviations comprises entre 20° et 70°; les intensités limites des courants mesurés sont alors dans le rapport de 1 à 7,5.

L'emploi des galvanomètres des tangentes tend à se restreindre

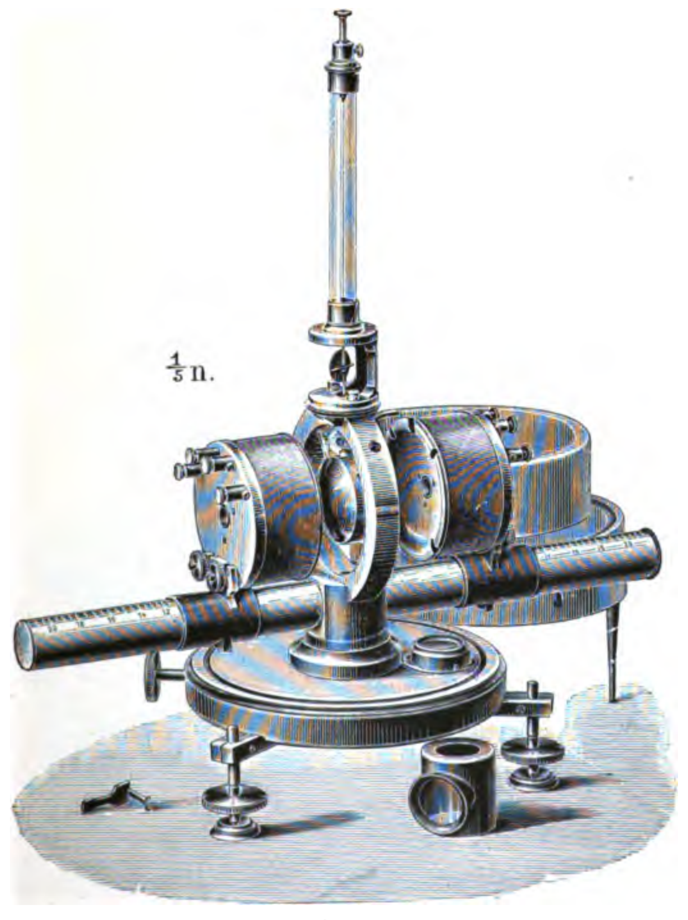


Fig 67

de plus en plus, par suite du peu de sensibilité de ces appareils et de la difficulté d'éviter les erreurs dues aux variations de la composante horizontale du magnétisme terrestre, dont la mesure exacte est longue et difficile.

Système Wiedemann. — Dans le galvanomètre de Wiedemann (fig. 67), l'aiguille aimantée est suspendue, par un long fil de cocon attaché à une tête de torsion, entre deux bobines mobiles sur des glissières orientées normalement à la direction du méridien. On peut ainsi faire varier la sensibilité de l'appareil. Des bobines de rechange permettent la mesure de courants d'intensités très différentes. En appelant d la distance moyenne des spires à l'aiguille, on a la formule

$$i = \mathcal{K} \frac{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi r^2 n} \operatorname{tang} \alpha.$$

Les lectures se font par la méthode de réflexion.

Système Kelvin. — Le galvanomètre industriel de Lord Kelvin repose sur le même principe. L'aiguille est supportée par un pivot dans une boîte mobile suivant l'axe de la bobine B. Les lectures se font directement à l'aide d'un index en aluminium mn qui se déplace au dessus d'un miroir destiné à éviter l'erreur de parallaxe.

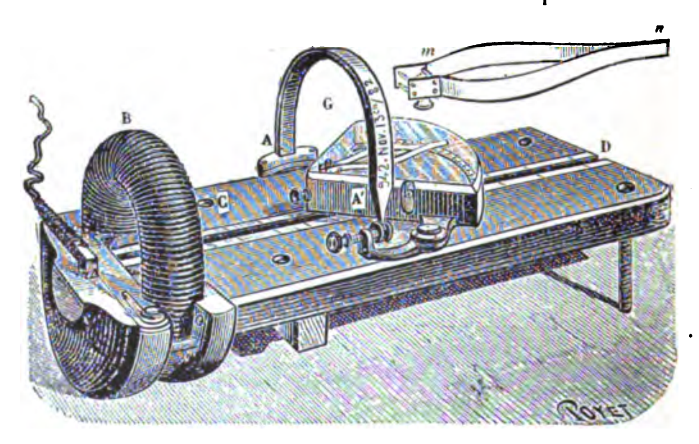


Fig. 68.

Le cadran est gradué de manière à indiquer directement la valeur

de la tangente de l'angle de déviation ; il suffit de multiplier la lecture par une constante pour obtenir la valeur de l'intensité du courant. Dans l'appareil de Lord Kelvin un aimant A peut être employé pour accroître le champ directeur et diminuer l'influence des champs parasites.

Système Obach. — Un autre artifice permettant de mesurer des courants d'intensités très différentes a été suggéré par M. Obach.

Le cadre est mobile autour d'un axe horizontal. En changeant son inclinaison, on peut affaiblir l'effet du courant sur l'aiguille. En appelant β l'inclinaison du cadre sur la verticale, on a l'égalité des couples

$$\frac{2\pi i n}{r} \mathcal{M} \cos\alpha \cos\beta = \mathcal{H} \mathcal{M} \sin\alpha$$

d'où

$$i = \frac{\mathcal{H} r}{2\pi n} \frac{\text{tang}\,\alpha}{\cos\beta}.$$

Correction pour la torsion des fils de suspension. — Dans les galvanomètres des tangentes destinés aux expériences de haute précision, dans lesquelles on mesure des courants faibles, les lectures se font par réflexion et l'aimant est suspendu par des fils de cocon ou de quartz. Dans ce cas, il y a lieu de tenir compte du couple de torsion dû au fil de suspension. Pour permettre la détermination de ce couple, le fil est porté par une tête de torsion, c'est à dire par un treuil qui peut tourner autour d'un axe vertical. On suspend d'abord l'aimant sans torsion. Pour cela, on commence par substituer à l'aimant un barreau de métal non magnétique qu'on oriente dans le plan méridien à l'aide de la tête de torsion. On remplace ensuite le barreau neutre par l'aimant et l'on tourne le treuil d'un angle δ lu sur le cercle gradué de la tête de torsion. A cause de la raideur du fil, l'aiguille dévie d'un angle δ' de même sens, de sorte que la torsion du fil se réduit à δ — δ'.

Le couple de torsion est

$$c\,(\delta - \delta') = \mathcal{H} \mathcal{M} \sin\delta'$$

ou simplement $\mathcal{H} \mathcal{M} \delta'$ pour un angle faible.

L'effet de la torsion peut donc être considéré sensiblement comme un accroissement de la composante $\mathcal{H}$ dans le rapport de

$$1 \text{ à } 1 + \frac{\delta'}{\delta - \delta'} = (1 + \theta).$$

Le rapport θ est appelé rapport de torsion. On a définitivement

$$i = \frac{\mathcal{H}(1+\theta)r}{2\pi n} \operatorname{tang} \alpha.$$

Mesure d'une décharge instantanée à l'aide du galvanomètre à aimant mobile. — Supposons qu'une quantité d'électricité q traverse le multiplicateur d'un galvanomètre à aimant mobile avec une rapidité telle que l'aiguille ne se déplace pas d'un angle appréciable pendant la décharge. On choisira pour cela un galvanomètre dont l'aiguille présente un moment d'inertie suffisant. En raisonnant comme on l'a fait au sujet du galvanomètre à bobine mobile, on arrive à l'expression

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{\mathcal{H} r}{2\pi n} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}}$$

ou encore, si l'amortissement est faible,

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{\mathcal{H} r}{2\pi n} \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}\right).$$

Si la quantité d'électricité donnait une élongation trop grande, on pourrait employer un shunt, mais il faudrait avoir soin de calculer le décrément logarithmique avec ce shunt, parce que l'amortissement dû aux courants induits par l'aimant dans la bobine dépend de la résistance du shunt.

Les galvanomètres à aiguille lourde peu amortis oscillent longtemps avant de revenir au zéro; pour les arrêter, on envoie dans la bobine le courant d'une pile au moment où l'aiguille repasse par le zéro. En réglant convenablement le sens et l'intensité du courant, on peut arrêter à peu près brusquement l'aiguille.

Moyens employés pour développer la sensibilité des galvanomètres à aimant mobile. — *Forme à donner à la bobine.* Le galvanomètre des tangentes est peu sensible par suite de l'écartement qui sépare le multiplicateur et l'aimant. Aussi n'est-il guère employé dans les essais de précision que pour la mesure absolue des courants. Pour accroître sa sensibilité, il faut diminuer la distance des spires à l'aimant. Dans ce cas, la relation qui lie l'intensité du courant à la déviation est fort complexe et, en général, indéterminée.

Si l'on développe la fonction inconnue $i = f(\alpha)$ suivant la série de Mac-Laurin, on obtient

$$i = f(o) + \frac{\alpha}{1} f'(o) + \frac{\alpha^2}{1.2} f''(o) + \dots$$

La fonction doit s'annuler avec α; d'où il résulte que $f(o) = o$. De plus, si la déviation est très faible, on est autorisé à négliger le 3e terme ainsi que les suivants, et à admettre que l'intensité est proportionnelle à la déviation :

$$i = k\,\alpha.$$

Le coefficient k, qui constitue le facteur de réduction du galvanomètre, se détermine en envoyant dans ce dernier un courant d'intensité connue.

Afin de déterminer la forme la plus avantageuse à donner à la bobine en vue d'économiser le fil et de diminuer la résistance du cadre, reprenons l'expression de l'intensité du champ dû à un courant circulaire de rayon R en un point de l'axe situé à une distance r

$$\mathcal{H} = 2\pi i \frac{R^2}{(r^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Si l'on pose $\mathcal{H}$ = constante, et si l'on considère R et r comme variables, on obtient l'équation d'une courbe présentant deux parties symétriques (fig. 69).

L'aire limitée par cette courbe est la section méridienne d'un volume de révolution suivant lequel on peut enrouler le fil. Toutes les spires remplissant un tel volume ont sur l'unité de pôle cen-

trale une action au moins égale à $\mathcal{H}$. Toutes les spires extérieures à ce volume ont une action moindre. La section hachurée de la fig. 69, qui ménage une cavité cylindrique pour loger l'aiguille,

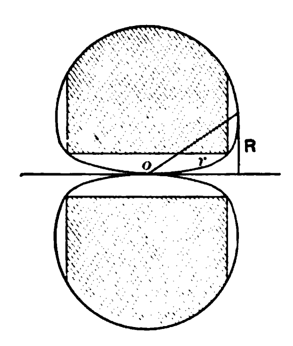


Fig 69.

représente donc la forme rationnelle de la bobine d'un galvanomètre de grande sensibilité. Lord Kelvin s'est rapproché le plus possible de cette forme dans la construction de ses galvanomètres.

Dispositions d'aimants. Nous avons vu que la déviation obtenue au galvanomètre des tangentes est indépendante du moment magnétique de l'aiguille. On pourrait donc à la rigueur se contenter d'une aiguille en fer doux qui s'aimanterait sous l'action combinée du magnétisme terrestre et du courant. Mais, dans les conditions présentes, ce système présenterait des inconvénients graves. Les forces agissantes étant faibles, les oscillations seraient très lentes et le rapport de torsion considérable. De plus, la position de l'axe magnétique varierait dans l'aiguille, de sorte que les déviations lues sur l'échelle n'exprimeraient pas véritablement les angles de l'axe magnétique avec la position de repos.

Pour ces raisons, on emploie, dans les galvanomètres destinés à la mesure des courants faibles, des aiguilles aimantées aussi fortement que possible, pour que leur magnétisme ne varie pas sous l'action du courant.

On peut accroître la déviation provoquée par l'action électromagnétique en diminuant l'action directrice de la terre sur l'aiguille mobile. Il y a deux moyens d'arriver à ce but (fig. 70). A la tige qui supporte l'aiguille et qui traverse le multiplicateur, on fixe une

seconde aiguille, orientée en sens inverse de la première. En choisissant des aiguilles de moments magnétiques peu différents, on diminue autant qu'on veut le couple directeur dû à la terre. Un tel système d'aiguilles est dit *astatique*. M. Weiss est arrivé à établir un système astatique présentant un faible moment d'inertie, en employant deux aimants verticaux identiques ayant leurs pôles de noms contraires accolés. On forme ainsi un circuit magnétique qui s'oppose à la désaimantation des barreaux.

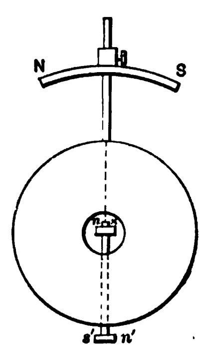


Fig. 70.

L'action terrestre peut également être modifiée par un aimant directeur N S, fixé au dessus de l'aiguille. En changeant la position et l'orientation de cet aimant, il est possible de diminuer ou d'augmenter à volonté l'effort directeur.

Le système astatique avec aimant directeur a l'avantage de rendre l'équipage mobile moins sensible aux influences magnétiques extérieures.

Dans les appareils très sensibles employés avec un système astatique, chacun des aimants qui composent celui-ci est entouré d'un multiplicateur.

Lorsque les galvanomètres sont destinés à la mesure des courants très faibles qui traversent les corps peu conducteurs, on compose les multiplicateurs d'un grand nombre de spires dont la résistance totale dépasse parfois 20 000 ohms. Il faut alors isoler, avec le plus grand soin, toutes les parties du circuit électrique. Les bobines et les bornes sont portées par des supports ou des colonnettes en ébonite. Les appareils sont enfermés dans des cages dont l'atmosphère intérieure est desséchée par des moyens chimiques.

En utilisant les dispositifs précédents, on obtient des galvanomètres donnant jusque 10 000 divisions par micro-ampère, l'échelle étant placée à une distance du miroir égale à 1 000 divisions. A la valeur de la constante, on joint celle de la période d'oscillation pour caractériser un tel appareil.

Ces galvanomètres très sensibles sont surtout employés pour la mesure des résistances d'isolement et les mesures bolométriques.

Amortissement du mouvement du système mobile. — On recherche, pour les mesures de précision, non seulement des galvanomètres très sensibles, mais des appareils qui permettent

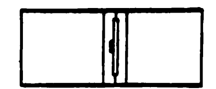


Fig. 71.

des lectures rapides. Pour cela, on amortit le mouvement des aiguilles. Les moyens employés sont d'ordre mécanique et d'ordre électrique.

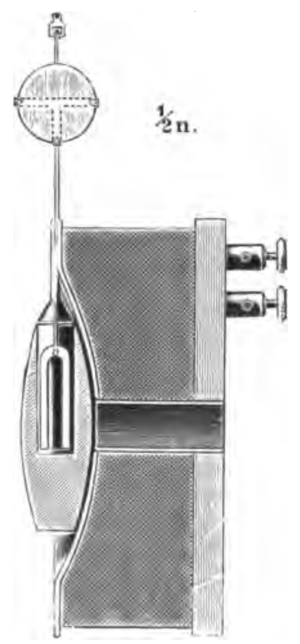


Fig. 72.

Les aiguilles et leurs suspensions sont naturellement amorties par la résistance que l'air oppose à leur mouvement. On peut augmenter cette résistance en fixant à l'aiguille une palette se déplaçant dans un espace confiné, où il se produit des remous d'air qui amortissent rapidement les oscillations.

Dans quelques galvanomètres de Lord Kelvin, l'aiguille est fixée au dos d'un petit miroir soutenu par un fil court dans un cylindre de cuivre, entre deux glaces très rapprochées. Si l'espace entre le miroir et le cylindre est suffisamment faible, le système est apériodique (dead beat), fig. 71.

On a aussi recours à des flotteurs plongeant dans la glycérine, mais la viscosité du liquide ne permet pas de se servir de ce moyen pour les appareils dans lesquels les couples directeurs sont faibles.

L'amortissement électrique est obtenu en profitant du couple retardateur développé par des courants induits occasionnés par le déplacement des aimants mobiles. Si le circuit galvanométrique est fermé, il y a un amortissement dû aux courants induits produits dans le multiplicateur. Siemens a réalisé un amortissement plus efficace en donnant à l'aimant la forme d'une cloche fendue, forme qui a l'avantage de rapprocher les pôles et de mieux retenir le magnétisme. Cet aimant est logé dans une masse de cuivre où l'on a percé, à cet effet, une cavité cylindrique, fig. 72. On obtient de la sorte des courants d'induction relativement intenses qui provoquent un amortissement rapide des oscillations.

Galvanomètre de torsion de Siemens et Halske.—Le galvanomètre suivant, très usité en Allemagne, permet des lectures directes entre des limites très étendues. L'aimant mobile A, en forme de cloche, est supporté par un fil de cocon dans un cadre multiplicateur CC. Il est dirigé par un ressort à boudin B pourvu, à la partie supérieure, d'une tête de torsion T. Les mouvements sont amortis par des ailettes en mica *mm* portées par l'équipage mobile.

Lorsque l'aimant est dévié sous l'action du courant, on le ramène au zéro, que pointe un index, grâce à une torsion α lue sur un cercle gradué.

On a la relation

$$i = \frac{\alpha}{k},$$

k étant une constante à déterminer par expérience. Il est à remarquer que, comme l'aimant est toujours ramené à la même position, le couple équilibré par la torsion ne dépend que de l'intensité du courant et du moment de l'aimant. Il est indépendant des champs extérieurs, à la condition que ceux-ci ne soient pas assez intenses pour modifier le moment magnétique de l'aimant mobile.

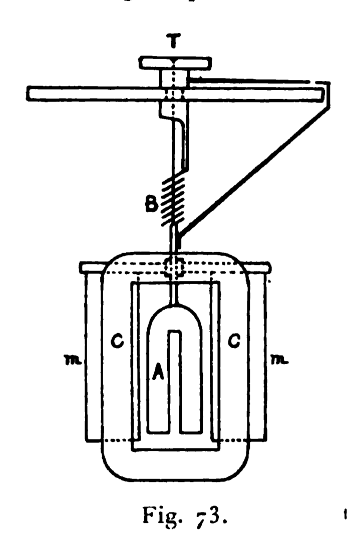


Fig. 73.

Le ressort directeur peut être tordu de 360° sans que la limite d'élasticité soit dépassée, ce qui permet la mesure de courants très différents. On peut encore étendre les limites d'emploi de l'appareil en utilisant des shunts combinés au besoin avec des résistances mises en série avec le galvanomètre.

Galvanomètres cuirassés de Du Bois et Rubens. — ***Galvanomètre astatique à 4 bobines*** (fig. 74). Ce galvanomètre comporte 2 paires de bobines fixées sur un plateau vertical en ébonite. Dans une rainure ménagée dans le plateau passe un fil de quartz supportant les deux aimants d'un système astatique, le miroir et un disque mince servant d'amortisseur. Ce disque se meut entre deux autres disques dont on peut régler à volonté la distance. Il se produit entre les disques des remous d'air déterminant l'amortissement.

, Pour garantir l'appareil contre les effets magnétiques extérieurs, MM. Du Bois et Rubens enveloppent le galvanomètre et les aimants

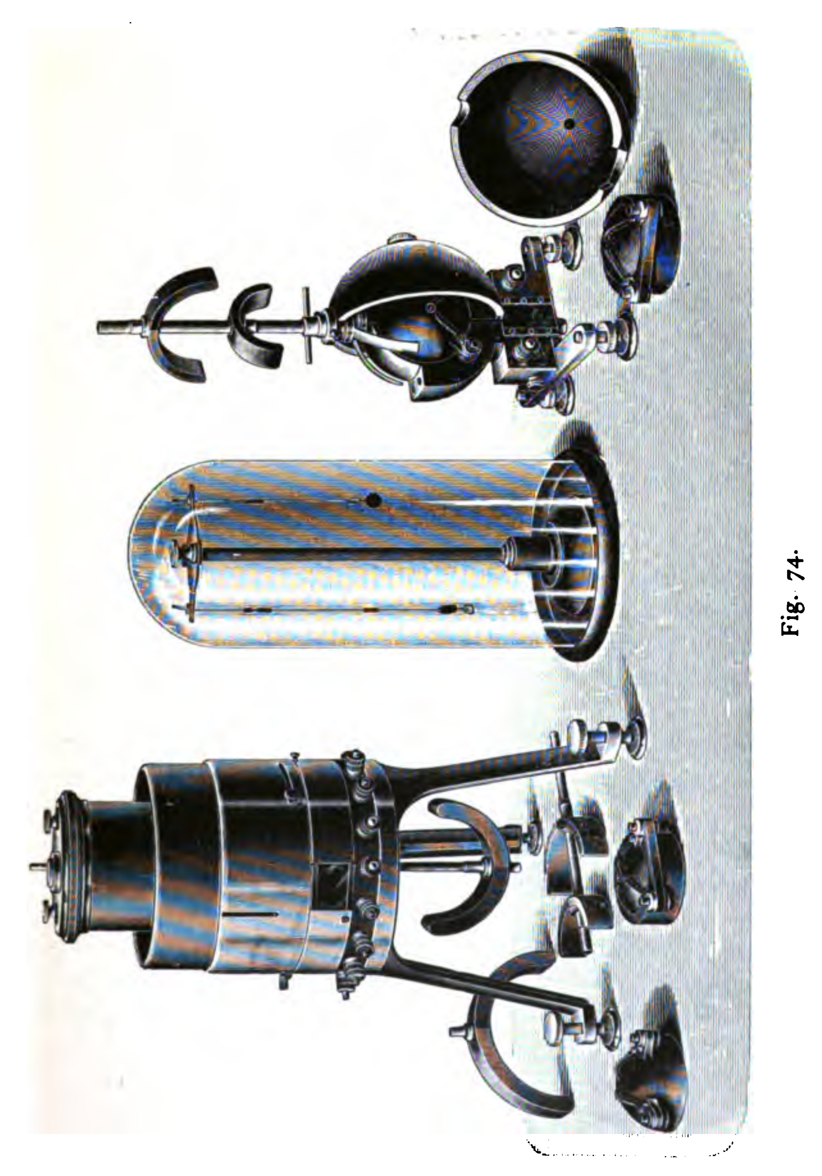


Fig. 74.

directeurs dans une double cuirasse cylindrique en fer forgé.

Une série d'aimants directeurs d'ouvertures et de moments magnétiques divers accompagnent l'appareil.

Galvanomètre cuirassé à 2 bobines fig. 74. — Les cuirasses sont en forme de sphères coupées suivant un grand cercle. Les joints sont disposés à 90° et rodés de façon à assurer une grande conductibilité magnétique.

Chapitre VIII.

GALVANOMÈTRES ET AMPÈREMÈTRES DIVERS.

Galvanomètre différentiel. Modèle de Lord Kelvin. Modèle de l'auteur. Réglage et applications. — Toutes les méthodes de mesure du courant électrique étudiées précédemment sont des méthodes absolues (cas du galvanomètre des tangentes) ou des méthodes par comparaisons successives (cas d'un galvanomètre gradué à l'aide d'un courant connu). Il existe aussi une méthode de réduction à zéro permettant la comparaison des courants, basée sur l'emploi du *galvanomètre différentiel.*

Cet appareil comporte deux multiplicateurs parcourus par les courants à comparer et dont les actions électromagnétiques sont antagonistes.

Le modèle de Lord Kelvin, construit par M. Carpentier, possède un système astatique orienté par un aimant directeur. L'équipage mobile est suspendu à un fil de cocon ou de quartz. Il comprend une tige en aluminium portant, à la partie supérieure, un petit miroir concave sur le dos duquel sont fixés des fragments de ressorts de montre fortement aimantés. La partie inférieure porte un nombre égal de petits aimants dont les pôles sont orientés en sens inverse. Une palette en aluminium sert d'amortisseur à air.

Deux paires de bobines indépendantes entourent les deux groupes d'aimants. Ces bobines peuvent être facilement enlevées pour découvrir l'équipage mobile. Les deux paires de bobines agissent en sens contraires sur les aimants qu'elles entourent. Dans certains

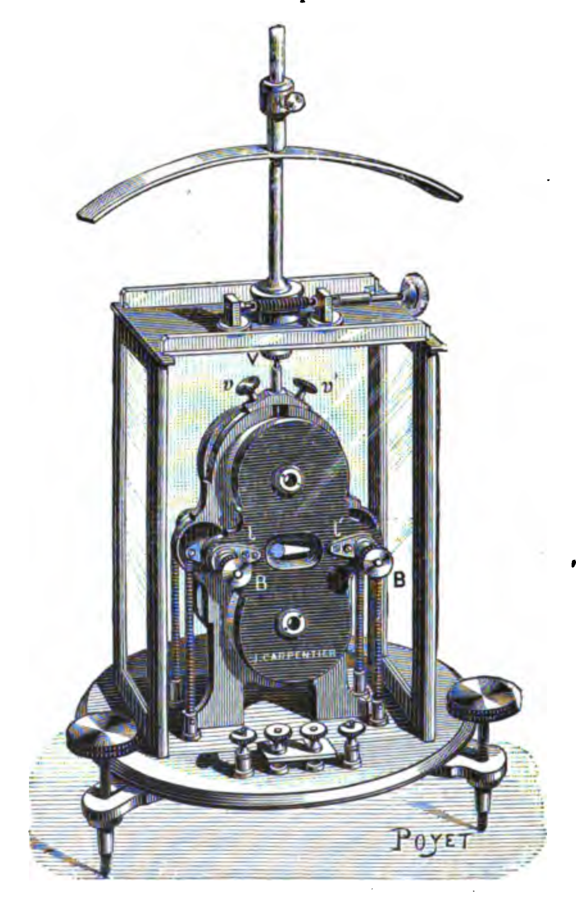


Fig. 75.

appareils, une petite bobine supplémentaire insérée dans un des circuits sert à compenser la prédominance éventuelle de l'autre circuit. Pour cela, cette bobine de réglage peut être éloignée ou approchée des aimants supérieurs.

L'appareil est porté, par un socle en ébonite, sur vis calantes et

est pourvu d'un niveau à bulle centrale et de 4 bornes, 2 par circuit. Il est enfermé dans une cage en verre ou en métal.

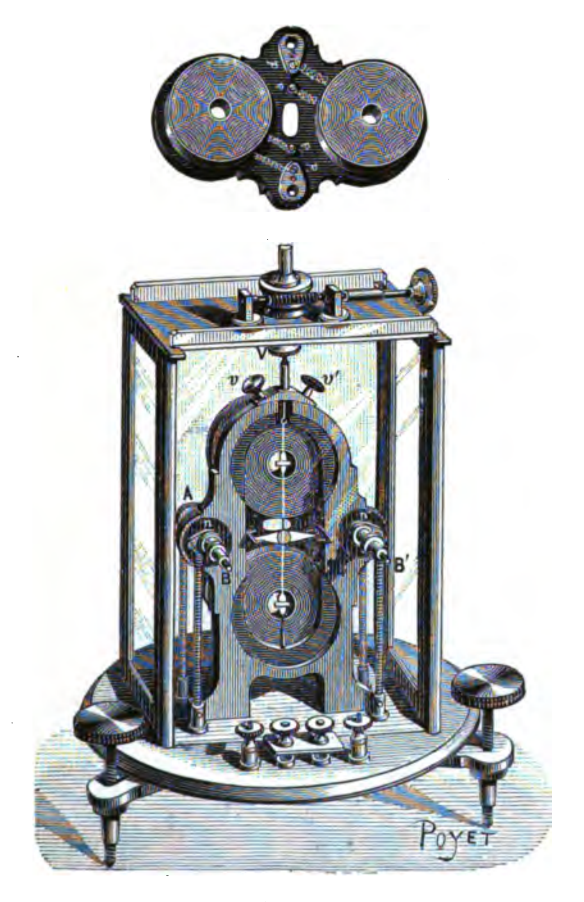


Fig. 76.

L'auteur a rendu différentiel le galvanomètre Deprez et d'Arsonval par le dispositif suivant (fig. 77). Le cadre mobile comprend deux bobines semblables, parcourues par le courant en sens inverses et suspendues à un fil de cocon, autour duquel est disposé un ressort métallique à boudin qui donne accès au courant dans les deux enroulements. Les courants dérivés à travers ceux-ci sortent par des fils tendus parallèlement et reliés à deux bornes distinctes.

Si les courants partiels sont égaux, les couples électromagnétiques développés se font équilibre, à la condition que les bobines se déplacent dans des régions du champ magnétique de même intensité. Afin de satisfaire à cette condition, les aimants sont munis de pièces polaires mobiles, dont la position peut être réglée par des vis micrométriques. Grâce à cet artifice, l'équilibre peut être obtenu si même, ce qui est le cas général, les deux bobines ne

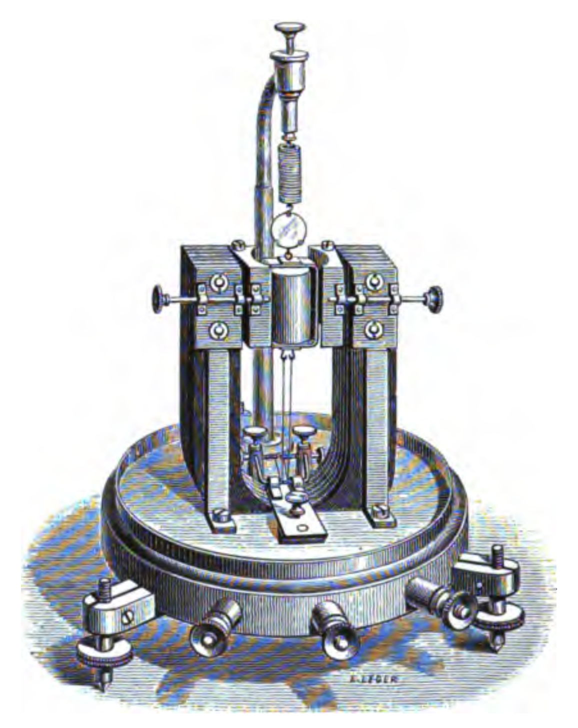


Fig. 77.

sont pas tout à fait identiques. Pour éviter les déplacements latéraux du système mobile occasionnés par une inégalité dans l'attraction exercée par les pièces polaires sur les courants voisins, il convient d'enrouler la plus grande partie des deux bobines à l'aide de deux fils jointifs et de ne laisser qu'un petit nombre de spires écartées, sur lesquelles s'exerce l'action régulatrice des pièces polaires.

Dans la plupart des galvanomètres différentiels, on règle les deux circuits dérivés de manière qu'ils aient mêmes résistances et mêmes effets électromagnétiques.

On étalonne d'abord les résistances par une des méthodes connues. On s'assure de l'égalité des effets électromagnétiques en faisant passer le même courant dans les deux bobines groupées en

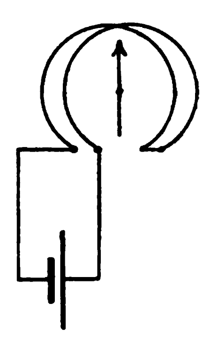


Fig. 78.

série, fig. 78. Si l'on n'obtient pas l'immobilité de l'équipage mobile, on opère la correction par l'un des artifices adoptés dans les appareils ci-dessus.

On peut encore contrôler l'égalité des résistances en dérivant les deux circuits par rapport aux pôles d'une même pile, fig. 79. On

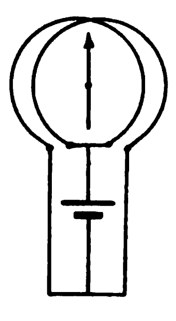


Fig. 79.

corrige la différence éventuellement trouvée en ajoutant une résistance passive à l'un des circuits.

L'appareil ainsi réglé convient pour comparer un courant

inconnu avec un courant connu fourni par une pile étalon dans un circuit de résistance déterminée. L'instrument est surtout en usage pour la mesure des résistances électriques.

On peut comparer des courants inégaux en intercalant un shunt entre les bornes de la bobine galvanométrique correspondant au courant le plus intense. En appelant m le pouvoir multiplicateur du shunt, les deux courants qui amènent l'équilibre du système mobile sont dans le rapport $m : 1$.

A la rigueur, il n'est pas nécessaire que les résistances et les actions électromagnétiques des deux bobines soient égales avec des courants égaux pour que l'appareil puisse être employé par la méthode différentielle.

Soit un galvanomètre pourvu de deux multiplicateurs quelconques, dont les constantes sont respectivement k et k'. Si l'on fait passer dans les bobines des courants d'intensités telles que l'équipage mobile soit en équilibre, on a

$$ki = k' i'$$

d'où

$$\frac{i}{i'} = \frac{k'}{k} = A.$$

Connaissant la constante A, on peut déterminer le courant i en fonction du courant i' qui l'équilibre. Un des cadres galvanométriques peut être, par exemple, enroulé de fil fin et traversé par le courant connu produit par une pile étalon, l'autre cadre étant formé de gros fil et parcouru par un courant intense.

Choix d'un galvanomètre. — Le choix d'un galvanomètre dépend essentiellement du genre de mesures qu'on veut effectuer. Désire-t-on poursuivre des essais de haute précision sur la mesure absolue des courants, on se servira d'un galvanomètre des tangentes, dont les lectures par réflexion se feront par la méthode subjective. Cet appareil sera placé dans un local construit et meublé avec la préoccupation d'éviter les corps magnétiques. Les conducteurs de connexion composant les circuits seront concentriques ou formés de fils cordés, afin d'éviter les effets électromagnétiques des courants.

Les mesures relatives de précision se font de préférence avec

des galvanomètres à aimant fixe, qui sont moins influencés que les galvanomètres à aimant mobile par les champs parasites. Pour les mesures exigeant une très grande sensibilité, on choisit les galvanomètres astatiques du genre Kelvin, et, pour les mesures balistiques, les galvanomètres à aiguilles lourdes mobiles sont les plus convenables.

Nous avons résumé dans le tableau suivant les principaux facteurs de quelques types usuels de galvanomètres, la sensibilité étant définie par la déviation, par micro-ampère, en divisions d'une échelle placée à une distance de 1 000 divisions, la durée d'une oscillation complète étant ramenée à 1 seconde et la résistance du galvanomètre réduite à 1 ohm, en admettant, ce qui n'est qu'approché, que la sensibilité est proportionnelle à la racine carrée de la résistance.

GALVANOMÈTRES.	Résistance en ohms.	Durée d'oscillation en secondes.	Déviation par micro-ampère à 1 000 divisions de l'échelle.	Sensibilité ramenée à 1 ohm et à 1 seconde.
Aimants fixes.				
Siemens et Halske (fig. 63)-1	15	5	40	0,413
Siemens et Halske (fig. 63)-2	350	14	1 280	0,349
Ayrton (fig. 62). . . .	13,2	2,2	32,5	1,85
Modèle simple (fig. 60).	200	2	14	0,25
Suspension à boudins (fig. 61)	446,4	2	92	1,1
Aimants mobiles.				
Edelman (fig 67) . . .	600	18	1 000	0,126
Kelvin (fig. 75) . . .	6 000	20	64 000	2,07

Quand il s'agit de mesures à effectuer dans le voisinage des dynamos, le galvanomètre Deprez et d'Arsonval peut être employé. Pour les mesures courantes, on préfère les appareils à lecture directe qui sont moins encombrants et qui sont suffisants lorsque l'approximation à atteindre est inférieure à 1/100.

Un galvanomètre industriel ou *ampèremètre* doit être portatif; il doit pouvoir se mettre en station rapidement, soit sur une table,

soit contre un mur. Il faut qu'un tel instrument soit à lecture directe, la graduation étant faite en ampères ou en multiples de l'ampère; on cherche à obtenir autant que possible des divisions également écartées pour des différences égales d'intensité.

Les galvanomètres industriels doivent être très peu influencés par les champs magnétiques parasites; cette condition est particulièrement importante pour les appareils à placer sur les tableaux de distribution des usines électriques.

Les systèmes mobiles des ampèremètres doivent être soumis à des couples assez énergiques pour prendre rapidement leur position d'équilibre. Au besoin, un amortissement spécial est utilisé pour accélérer les lectures. Lorsque les courants subissent une variation périodique, comme c'est le cas lorsque les dynamos sont conduites par des moteurs mal réglés, il importe que la période d'oscillation propre de l'ampèremètre ne corresponde pas à celle du courant; sinon les fluctuations s'amplifient au point de rendre les lectures impossibles.

Il va de soi qu'un galvanomètre industriel doit absorber la plus petite partie possible de l'énergie électrique disponible.

Ampèremètres à cadre mobile. Système Weston. Système Chauvin et Arnoux. — M. Weston a rendu le galvanomètre

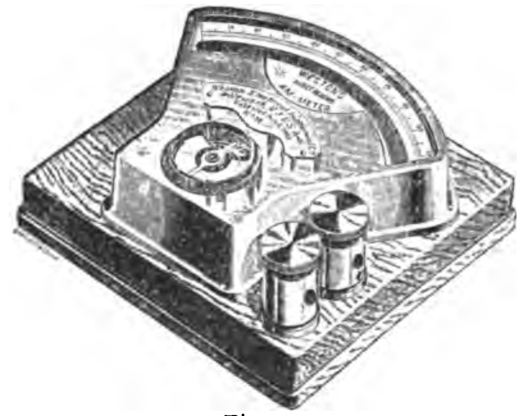


Fig. 80.

Deprez et d'Arsonval portatif en supportant la bobine mobile entre deux pointes pivotant sur des chapes en agathe et en employant

deux ressorts spiraux en bronze phosphoreux pour diriger le cadre et donner accès au courant, fig. 80 et 81. La bobine est enroulée sur une carcasse d'aluminium qui assure l'amortissement des

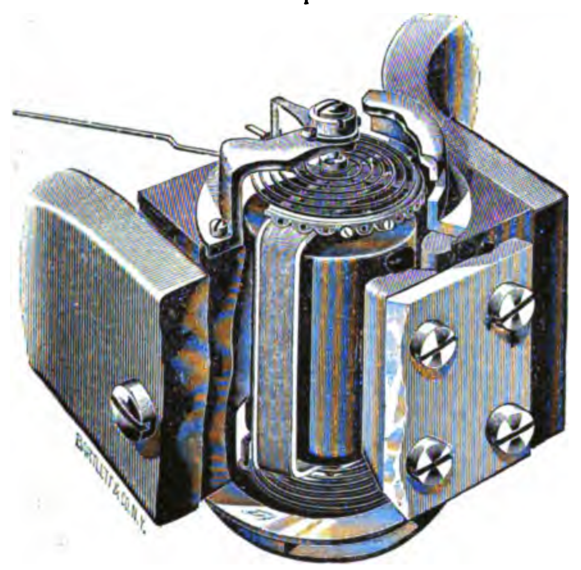


Fig. 81.

oscillations. Un index effilé en aluminium, fixé au cadre, pointe les indications sur un cadran gradué dans le plan duquel se trouve une glace qui permet d'éviter l'erreur de parallaxe. Grâce à l'emploi de pièces polaires étendues, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux courants, dans un angle d'environ 70°.

Pour la mesure des courants intenses, l'appareil contient un shunt relié aux bornes extérieures. L'appareil doit être vérifié de temps en temps par suite de l'affaiblissement progressif, d'ailleurs très faible, de l'aimant directeur.

M. Weston construit sur le même principe des millivoltmètres qui, combinés avec des shunts constitués par des étalons de 0,1, 0,01 ou 0,001 d'ohm, permettent de mesurer des courants compris entre des limites très étendues.

MM. Chauvin et Arnoux ont simplifié de la manière suivante la construction de ce galvanomètre. L'aimant de forme circulaire est alésé de manière à éviter les pièces polaires rapportées. C'est une

pièce d'acier au tungstène trempé dur, puis recuit légèrement avant l'aimantation, de manière à augmenter sa force coërcitive. Les

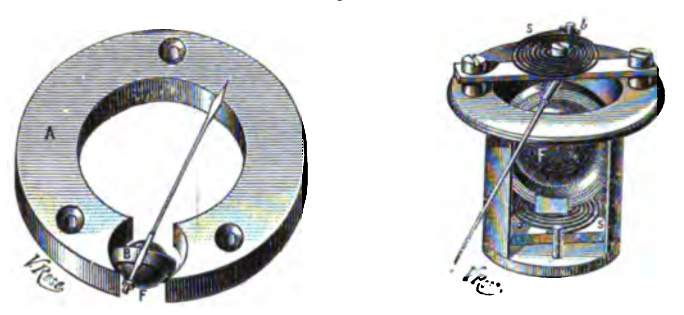


Fig. 82. Fig. 83.

lignes de force de l'aimant sont condensées à l'aide d'une sphère d'acier fabriquée comme les billes pour coussinets. La bobine est une couronne de fil de cuivre sertie entre deux bagues de cuivre

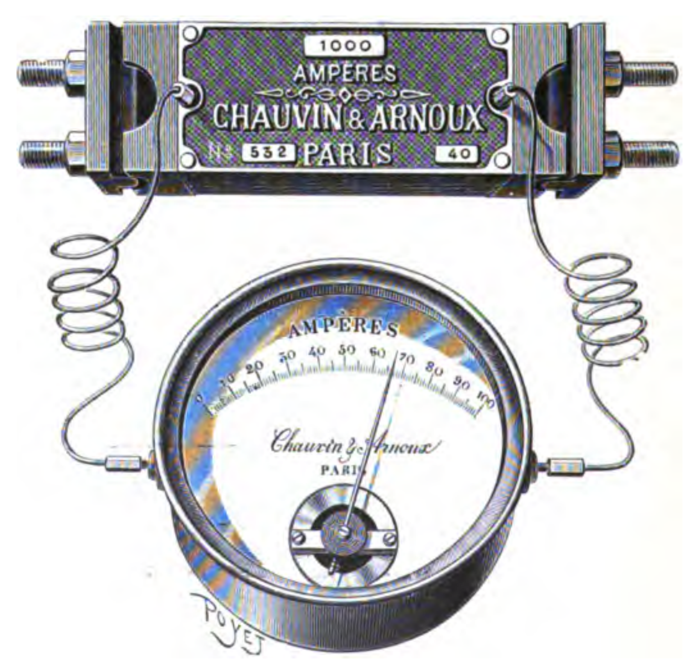


Fig. 84.

découpées dans un tube, lesquelles servent d'amortisseur. Ce système mobile monté entre pointes d'acier pivotant sur des chapes en pierre fine est dirigé par deux ressorts spiraux.

La fig. 84 montre un appareil semblable dérivé sur une résistance faible en vue de mesurer des courants intenses.

Ampèremètres à bobine fixe. Systèmes Deprez et Carpentier, Hummel, Siemens et Halske, Dobrowolski, Evershed. Graduation. — Dans la majorité des galvanomètres industriels une pièce de fer doux est sollicitée par un cadre fixe de manière à s'orienter dans la direction des lignes de force magnétique dues au courant ou à se déplacer vers la région du champ dont l'intensité est la plus grande. La force antagoniste qui s'oppose à l'action du courant est l'attraction d'un aimant directeur, le poids de la pièce mobile ou l'élasticité d'un ressort.

L'attraction d'un aimant directeur est mise à profit dans le galvanomètre Deprez et Carpentier qui comprend une bobine B, à l'intérieur de laquelle il y a une palette de fer doux pivotant entre deux pointes et orientée par un double aimant recourbé (fig. 85 et 86). Le courant traversant la bobine tend à faire devier la palette qui, sous l'action des deux couples contraires, prend une position d'équilibre marquée par un index. Si l'axe de la bobine était normal à la ligne des pôles de l'aimant, le couple dû au courant

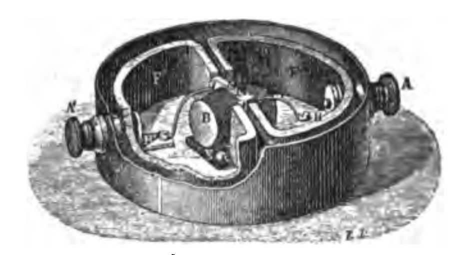


Fig. 85.

irait en s'affaiblissant à mesure que l'aiguille dévie. Comme le couple directeur augmente au contraire dans ces conditions, les accroissements de déviation correspondant à des variations de courant égales seraient de plus en plus petits. Afin d'éviter cet

inconvénient, la bobine est inclinée sur la ligne des pôles et le courant y est dirigé de manière à ramener l'aiguille parallèlement

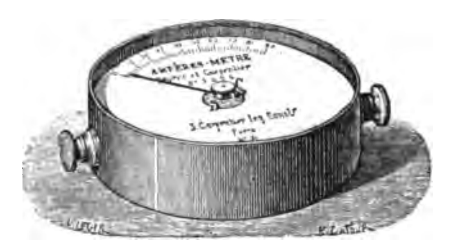


Fig. 86.

aux spires du fil. Le couple déviant croît alors en même temps que le couple directeur, et il y a à peu près proportionnalité entre l'angle de déviation et le courant.

Grâce à la puissance de l'aimant directeur, les mouvements de l'aiguille sont rapides et l'influence des aimants et des courants voisins est peu sensible.

Dans l'appareil de M. Hummel, une palette courbe en fer doux E (fig. 87) pivote autour d'un axe et entraîne dans son mouvement un indicateur en cuivre Z, dont l'extrémité se déplace devant une graduation. L'équipage mobile est en équilibre sous l'action de la pesanteur quand l'index pointe le zéro. Un petit écrou vissé sur Z et faisant office de contrepoids permet de ramener l'index à l'extrémité de la graduation lorsqu'on met l'appareil en place. Quand on envoie le courant à mesurer dans le conducteur L L, la palette est sollicitée à s'approcher de celui-ci en vertu

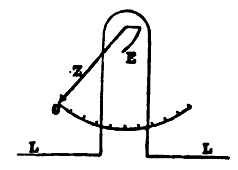


Fig. 87.

teur L L, la palette est sollicitée à s'approcher de celui-ci en vertu de la tendance qui pousse les corps magnétiques à se déplacer vers les parties du champ où l'intensité est maxima. Il s'ensuit que l'index est dévié d'un angle correspondant à l'équilibre entre le

couple électromagnétique et le couple de la pesanteur. Lorsque le courant est intense, une seule boucle de fil conducteur suffit, comme le montre la fig. 87, pour produire le champ magnétique nécessaire au déplacement de la palette E. Si le courant est faible, on enroule un nombre de spires de fil fin suffisant pour réaliser l'intensité de champ voulue.

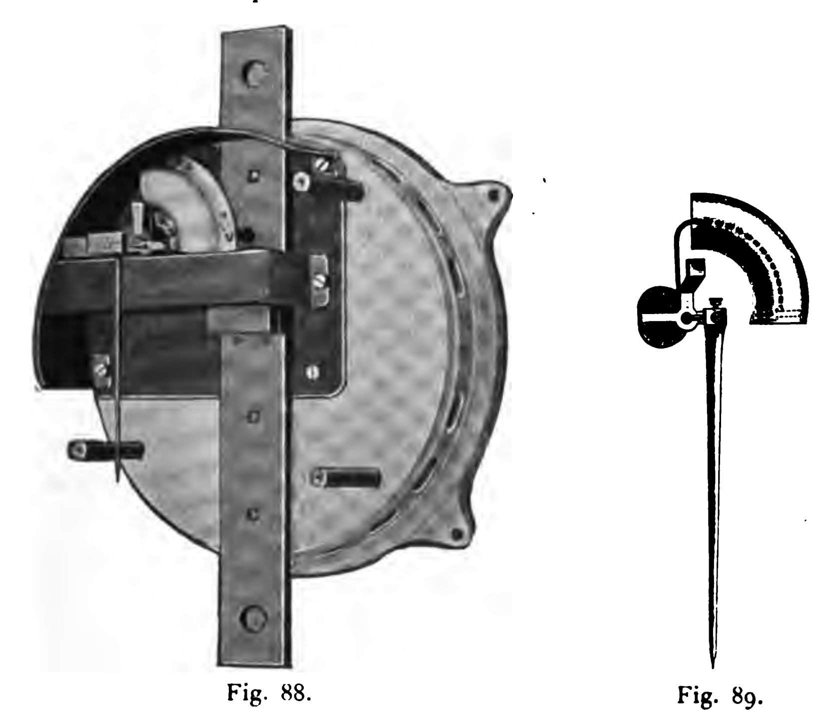


Fig. 88. Fig. 89.

Les fig. 88 et 89 représentent l'ampèremètre Siemens et Halske basé sur le même principe que le précédent. L'appareil est amorti par un piston mobile dans un cylindre à air et est préservé contre l'influence des champs extérieurs par un écran en tôle de fer doux.

Dans le système Dobrowolski, un fil de fer doux, équilibré par un contrepoids, tend à descendre dans une bobine sous l'action du courant qui parcourt celle-ci. Un index fixé à l'axe de rotation mesure la déviation, fig. 90.

Enfin, dans quelques ampèremètres, les forces électromagnétiques qui sollicitent la pièce de fer doux mobile sont modifiées

par la présence de pièces de fer fixes, aimantées par le courant et réagissant sur la pièce mobile. Si les pièces de fer doux fixes s'aimantent dans le même sens que cette dernière, elles l'attirent. C'est ainsi que, dans l'ampèremètre Evershed (fig. 91), deux pièces de fer doux *p p'*, disposées à l'intérieur de la bobine magnétisante, sont aimantées par le courant et agissent sur une barrette de même

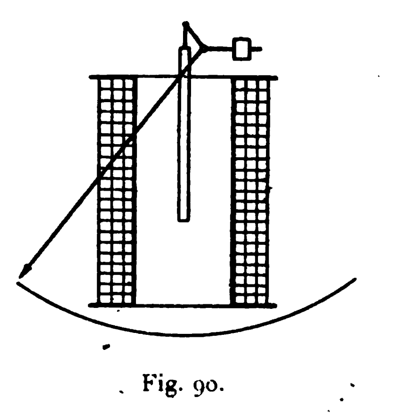


Fig. 90.

métal *b* fixée latéralement à l'axe de l'aiguille indicatrice. En déplaçant *p* et *p'*, on peut modifier le déplacement de *b* correspondant à une même variation du courant dans la bobine. D'autres appa-

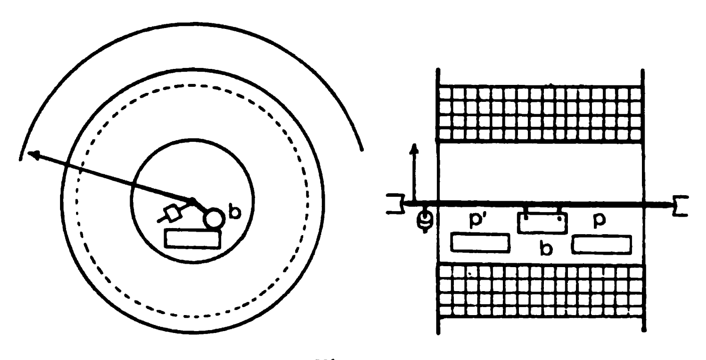


Fig. 91.

reils comportent des pièces fixes disposées à l'extérieur de la bobine pour renforcer l'action électromagnétique du courant sur l'équipage mobile.

Dans les appareils à pièces de fer doux mobiles et sans aimants permanents, le couple déviant dépend du carré de l'intensité du courant. En vue de diminuer les effets d'hystérésis qui donnent lieu à des aimantations différentes pour un même courant électrique, on doit employer des dispositions propres à aimanter fortement le fer doux.

Néanmoins, on n'arrive jamais à annuler complètement les effets d'hystérésis qui sont surtout sensibles dans les systèmes à pièces de fer auxiliaires. C'est pourquoi on doit faire passer le courant toujours dans le même sens à travers l'appareil, afin d'éviter les renversements de magnétisme du fer doux et les aimantations rémanentes opposées qui en résultent. On marque d'une croix la borne de l'appareil qui doit être reliée au pôle positif de la source d'électricité.

Les appareils à fer doux dépourvus d'aimants peuvent servir pour les courants alternatifs, à la condition d'être gradués pour la fréquence particulière des courants qu'ils sont appelés à mesurer. Les courants de Foucault qui se développent dans la palette de fer ont pour effet de réduire l'aimantation de celle-ci d'autant plus que la fréquence est plus grande et que la section de la palette est plus forte dans le sens normal aux lignes de force.

Les courants de Foucault dans les pièces métalliques qui servent à envelopper et à consolider l'instrument influencent également les indications. Ces pièces doivent être sectionnées pour réduire les courants et l'on doit faire usage, autant que possible, de supports et de couvercles isolants; c'est ainsi que les carcasses des bobines sont des cylindres isolants ou des cylindres métalliques fendus. La grandeur des courants de Foucault induits dans la palette de fer doux et dans les autres pièces métalliques dépend d'ailleurs de la forme des courants périodiques.

Afin d'utiliser le même instrument pour les courants continus et les courants alternatifs, M. Evershed se sert d'un shunt inductif qui absorbe à peu près 6 pour 100 du courant continu à mesurer et seulement 2 pour 100 du courant alternatif. Les quelques pour cent que la bobine magnétisante absorbe en plus avec les courants alternatifs donnent au fer doux mobile son aimantation normale en neutralisant l'influence des courants de Foucault.

Un ampèremètre est généralement gradué à l'aide d'un galvano mètre étalon. On fait passer des courants croissants dans les deux appareils et l'on note les déviations de l'ampèremètre correspondant à des multiples ou à des sous-multiples de l'ampère. Pour constater nettement les effets de l'hystérésis, on relève les déviations déterminées par des courants croissants et par des courants décroissants, obtenus à l'aide d'un rhéostat à réglage continu ne provoquant pas d'interruptions du courant. Le fer doux suit ainsi les variations cycliques de la courbe du magnétisme.

Les frottements du système mobile s'estiment en vérifiant de combien on peut modifier le courant en plus ou en moins sans altérer visiblement l'indication de l'instrument.

En général, les appareils à pièces de fer doux mobiles et sans aimants directeurs, sont très influencés par les aimants et les courants voisins. Ils ne justifient pas le succès qu'ils ont obtenu comme appareils de mesure pour les tableaux de distribution. On a conseillé l'emploi de systèmes astatiques formés par la combinaison de deux équipages. Mais cette complication enlève aux ampèremètres leur principale qualité, qui est le bon marché.

Les ampèremètres à fer doux disposés sur les tableaux de distribution ne doivent être considérés que comme des indicateurs de courant; ils ne permettent pas de mesurer exactement l'intensité.

Chapitre IX.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES ACTIONS ÉLECTRODYNAMIQUES.

Principe. — Si l'on remplace l'aiguille aimantée d'un galvanomètre à cadre fixe par une bobine mobile dans laquelle le courant arrive par l'intermédiaire d'une suspension bifilaire métallique, la bobine mobile tend à se placer parallèlement à la bobine fixe quand les deux parties du système sont parcourues par des courants. Un instrument basé sur ce principe porte le nom d'*électrodynamomètre*.

L'action électrodynamique équilibrée par la torsion de la suspension est proportionnelle au produit des intensités des courants qui traversent les deux bobines et, si le même courant parcourt celles-ci, au carré de l'intensité; d'où la possibilité de se servir de ces instruments pour la mesure des courants alternatifs.

On peut aussi mesurer le couple électrodynamique en suspendant, au-dessus d'une bobine disposée à plat, une seconde bobine parcourue par le même courant, et en équilibrant, à l'aide d'une balance, l'attraction mutuelle des bobines. Les appareils de ce genre sont appelés *balances électrodynamiques*.

Ces instruments sont spécialement adaptés à la mesure des courants alternatifs. Il faut donc avoir soin d'éliminer de leur construction toute pièce métallique massive susceptible d'être le siège de courants de Foucault qui fausseraient les indications.



Fig. 92.

On sait que ces courants exercent une action répulsive sur les courants alternatifs qui leur donnent naissance. Les socles et couvercles seront isolants et les pièces de consolidation seront divisées autant que possible, si elles sont en métal.

Electrodynamomètre de Weber. — La bobine mobile est portée par un système bifilaire et disposée normalement à la bobine fixe, fig. 92. Une tête de torsion permet de ramener la bobine mobile dans sa position de repos. Un miroir sert à la lecture des déviations. L'appareil est mis en station de manière que l'axe du cadre mobile soit orienté dans le méridien magnétique.

A étant une fonction des dimensions et des distances relatives des bobines, le couple électrodynamique peut être représenté, pour une déviation θ, par $A\, i^2 \cos\theta$ et s'annule lorsque les bobines sont parallèles et possèdent le même centre de figure.

Le couple antagoniste développé par la torsion du bifilaire est $c \sin\theta$.

D'autre part, le couple dû au champ magnétique terrestre est $\pm\, B\, i\, \mathcal{H} \sin\theta$ suivant le sens du courant.

On a l'équation d'équilibre

$$A\, i^2 \cos\theta = c \sin\theta \pm B\, \mathcal{H}\, i \sin\theta.$$

Si l'on ramène l'axe de la bobine mobile parallèlement au méridien en agissant sur la tête de torsion, le troisième couple s'annule et l'on a simplement, pour une torsion θ,

$$i = \sqrt{\frac{c \sin\theta}{A}}.$$

Lorsque l'angle θ est suffisamment faible, on peut écrire

$$i = \sqrt{\frac{c\theta}{A}}.$$

Si la bobine mobile était suspendue comme dans le galvanomètre Deprez et d'Arsonval, l'appareil serait plus sensible et cette dernière relation serait rigoureusement applicable.

Dans le cas où l'on mesure des courants alternatifs, le magnétisme terrestre est sans influence sur la mesure, car il soumet le cadre à un couple oscillant dont l'effet est nul si la fréquence est suffisante.

Électrodynamomètre Siemens. — L'appareil précédent ne convient guère que pour la mesure des courants faibles, à cause du double rôle de la suspension. Pour mesurer les courants intenses,

Siemens a donné à l'électrodynamomètre la forme représentée dans la fig. 93. La bobine mobile, placée à l'extérieur de la bobine fixe, est réduite à une seule spire suspendue par un fil de cocon et orientée par un ressort à boudin fixé à une tête de torsion. Le courant pénètre dans la spire par des godets à mercure superposés suivant l'axe de rotation. Un fil à plomb sert à disposer l'appareil de niveau. La tête de torsion permet de ramener le cadre mobile dans la position indiquée par un index porté par celui-ci.

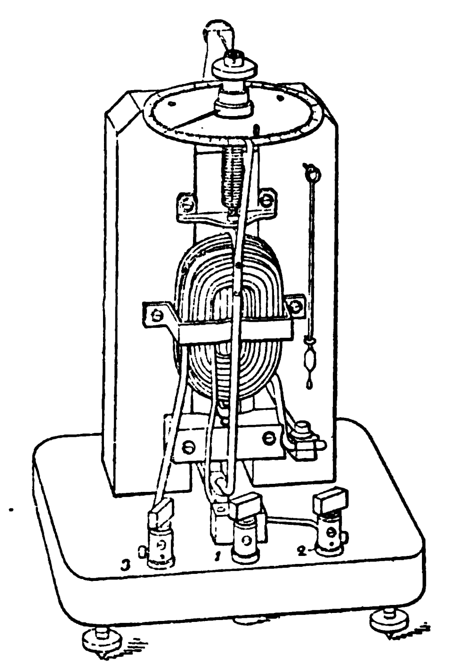


Fig. 93.

L'action de la terre est nulle si le plan du cadre mobile est normal au méridien. Elle est, en tous cas, très faible, puisqu'il n'y a qu'une seule spire traversée par le courant. Le socle et le montant qui sert de support à la bobine fixe sont en bois ou en ébonite pour éviter les courants parasites dans le cas de la mesure des courants alternatifs.

La formule d'emploi de l'instrument est

$$i = \frac{1}{K}\sqrt{\theta}.$$

Si l'on mesure des courants alternatifs, la relation devient

$$i_{eff} = \frac{1}{K}\sqrt{\theta}.$$

Électrodynamomètre de M. Fleming. — Un disque de cuivre B est suspendu au centre d'une bobine C et est orienté à 45° par rapport à cette bobine. Lorsqu'on fait passer dans celle-ci des courants ondulatoires, leur réaction sur les courants induits dans le disque tend à amener ce dernier dans la position *bb'*, pour laquelle le flux périodique qui traverse la plaque est minimum. Le miroir M permet de lire, par réflexion, l'angle d'équilibre de la pièce mobile, soumise d'une part aux forces électrodynamiques, qui sont sensiblement proportionnelles au carré des courants à mesurer et, d'autre part, à la réaction de torsion du fil de suspension. En substituant au disque de cuivre un bout de fil de fer, M. Fleming est arrivé à déceler au moyen de cet appareil des courants téléphoniques alternatifs de l'ordre du micro-ampère.

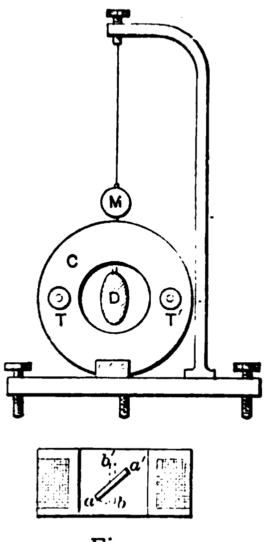


Fig. 94.

Ampèremètre Ferraris. — La Maison Siemens et Halske construit, sous le nom d'instruments Ferraris, une série d'appareils de mesure applicables aux courants alternatifs et basés sur les pro-

priétés des champs tournants. Cette série comporte des ampèremètres, voltmètres, ohmmètres, wattmètres et compteurs.

Les appareils consistent essentiellement en un anneau de fer muni de 4 projections polaires radiales intérieures, destinées à recevoir les différents enroulements. A l'intérieur est un anneau en fer fixe, entouré d'un tambour mobile en aluminium. A l'axe du tambour est fixée une aiguille qui se meut devant un cadran divisé. Au couple de rotation dû au champ tournant qui agit sur le tambour est opposé le couple de torsion de deux ressorts spiraux, enroulés en sens opposés pour éviter l'influence de la température. Des aimants amortissent les oscillations du tambour.

Ces instruments n'exigent qu'une dépense minime d'énergie. Ils sont peu sensibles aux changements de fréquence des courants mesurés. Enfin, ils ne sont pas influencés par les courants voisins. Pour les tensions et les intensités de courant élevées, on utilise avec ces appareils des transformateurs réducteurs.

Balance électrodynamique de Lord Kelvin. — On doit à Lord Kelvin une série d'appareils appelés ampèremètres-balances, dans lesquels un fléau porte à chacune de ses extrémités une bobine mobile disposée entre deux bobines fixes. Les six bobines sont

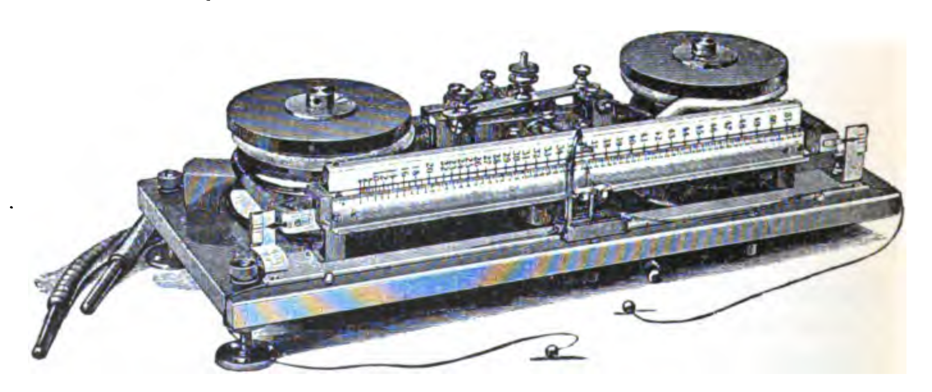


Fig. 95.

parcourues par le même courant, de telle manière que l'une des bobines mobiles soit attirée vers le bas et l'autre vers le haut. Les effets du magnétisme terrestre sont compensés par le fait que les

bobines mobiles sont parcourues dans le même sens par le courant. Pour amener celui-ci aux bobines mobiles, Lord Kelvin a eu l'idée ingénieuse de suspendre le fléau par des faisceaux très flexibles composés d'un grand nombre de fils fins en cuivre. Des poids mobiles sur les bras du fléau permettent de ramener celui-ci dans la position horizontale et d'estimer l'intensité du courant traversant l'appareil. Ces poids sont déplacés par l'intermédiaire d'un petit chariot qu'on fait mouvoir à l'aide de deux cordelettes de soie. Les index qui terminent le fléau servent à marquer la position horizontale de celui-ci.

Comme une bobine parcourue par des courants alternatifs est repoussée par les pièces métalliques voisines, les appareils servant à la mesure des courants de ce genre sont montés sur un socle d'ardoise et les bobines sont elles-mêmes enroulées sur des noyaux d'ardoise ou de porcelaine.

La formule de l'appareil est

$$i = \frac{1}{K}\sqrt{p}$$

ou

$$i_{eff} = \frac{1}{K}\sqrt{p},$$

p représentant le moment du couple dû à la pesanteur.

Les balances de Lord Kelvin présentent une graduation empirique. Il existe une série d'appareils permettant de mesurer de 1000 ampères à 0,001 d'ampère, l'échelle de chaque instrument étant graduée de 1 à 100. La précision de ces instruments peut monter à 0,1 pour 100. Ils sont très employés dans les laboratoires pour la graduation des ampèremètres et voltmètres à courants alternatifs. Dans les modèles adoptés pour mesurer les courants intenses, on est obligé de faire usage de conducteurs de forte section qu'on doit subdiviser pour éviter l'effet Kelvin et pouvoir appliquer les lois relatives aux conducteurs filiformes.

Balance absolue de M. Pellat. — M. Pellat a imaginé une balance électrodynamique dans laquelle une longue bobine fixe, disposée horizontalement et produisant un champ sensiblement uniforme dans sa région médiane, agit sur une petite bobine sus-

pendue verticalement dans cette région à l'extrémité d'un fléau de balance. Des poids attachés à l'autre extrémité du fléau équilibrent le couple électrodynamique que l'on peut déterminer par le calcul, en sorte que l'instrument permet des mesures absolues. Des corrections sont à faire pour tenir compte de l'influence des

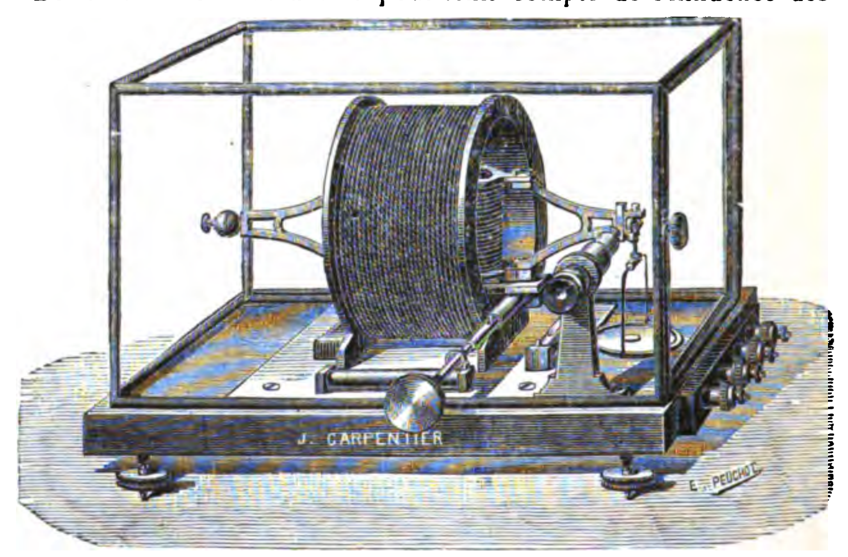


Fig. 96.

extrémités de la bobine fixe et de l'action du magnétisme terrestre sur la bobine mobile. Un autre appareil plus portatif, construit sur le même principe (fig. 96) et pourvu d'une bobine fixe de faible longueur, a reçu le nom d'ampère-étalon. Cet appareil, étalonné à l'aide du précédent, permet d'évaluer les courants en appliquant la formule

$$i = \frac{1}{K}\sqrt{p}.$$

Les balances de M. Pellat sont comparables entre elles à 0,0001 près, tandis que l'ampère n'est réalisé pratiquement par les pesées voltamétriques qu'au 0,001.

Chapitre X.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES EFFETS CALORIFIQUES.

Ampèremètres à dilatation. Système Holden. Système Cardew. Système Hartmann et Braun. — La loi de Joule montre qu'on peut déduire l'intensité du courant qui traverse un conducteur de la quantité de chaleur développée dans celui-ci. Ce procédé est applicable à la mesure des courants alternatifs, puisque l'effet est indépendant du sens du courant.

En enfermant le conducteur considéré dans un calorimètre, on peut mesurer la quantité de chaleur développée en un temps donné, et en conclure l'intensité efficace du courant. Cette méthode est rarement employée parce qu'elle entraîne des manipulations complexes et qu'elle offre peu de sensibilité.

Mais on utilise, particulièrement pour la mesure des courants alternatifs, les effets de dilatation simple ou de dilatation différentielle, produits par la chaleur dans des conducteurs homogènes ou hétérogènes traversés par les courants.

Voici un dispositif dû à M. Holden. Le courant traverse une bande métallique *h* découpée à l'emporte-pièce en forme de fer à cheval. Une bande semblable *h'*, plus mince, est fixée au

même support que la première. Les deux lames sont rivées ensemble vers le coude. La lame *h'* oblige la lame *h* à s'infléchir vers le bas lorsque celle-ci est dilatée par le courant. L'inflexion est amplifiée par un système de leviers et lue sur une échelle.

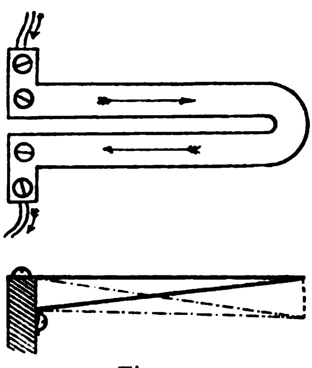


Fig. 97.

Les deux lames étant en même métal, les variations extérieures de la température ne causent aucune déviation, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise, comme dans le thermomètre métallique de Bréguet, la dilatation différentielle d'une hélice formée de deux métaux hétérogènes traversés par le courant.

Le métal servant de conducteur doit pouvoir résister à de hautes températures sans s'oxyder. Les alliages de platine-argent et de platine-iridium présentent cette qualité.

Le défaut de l'appareil précédent est d'être très lent à prendre son état de régime, par suite de la masse à échauffer. Il faut recourir à des conducteurs de très faible section pour remédier à cet inconvénient.

M. Cardew a été le premier à utiliser des fils ténus dans un appareil qui sert exclusivement de voltmètre (fig. 98).

Un fil mince, en alliage platine-argent, fixé par ses extrémités à deux vis A et B, passe sur une série de poulies en ivoire, P_1, p_1, P_2. La poulie mobile p_1 est tirée par un fil de soie qui fait un tour autour d'une poulie W et se termine par un ressort à boudin S_1. Lorsqu'un courant passe dans le fil d'alliage, celui-ci se dilate, la poulie p_1 descend sous l'action du ressort, et la rotation de la poulie W, amplifiée par un rouage L M, est indiquée par

une aiguille sur un cadran dont la figure montre la face postérieure. Les tiges supportant les poulies doivent avoir le même coefficient de dilatation que le fil.

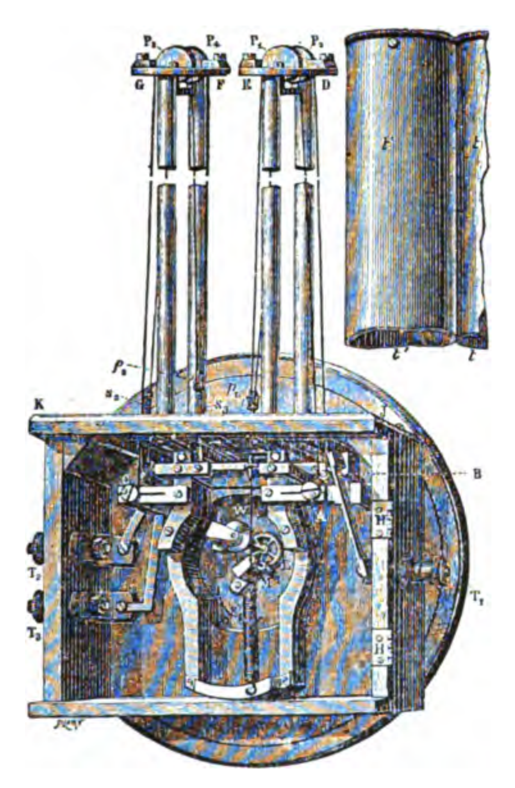


Fig. 98.

MM. Hartmann et Braun ont réduit la longueur du fil dilatable et ont placé celui-ci en dérivation sur un shunt de manière à faire servir l'instrument d'ampèremètre, fig. 99. Au fil mince en alliage platine-argent *f*, est fixé un fil de laiton *l*. Au milieu de ce dernier vient s'attacher un fil de soie *s*, passant autour d'une petite poulie et tendu par un ressort *r*. Lorsqu'il est échauffé par le courant dérivé, le fil *f* s'allonge et s'infléchit, ainsi que *l*, sous la tension du ressort *r*, tandis qu'un index porté par l'axe de la poulie enregistre une déviation.

L'appareil est gradué empiriquement. La plaque rigide qui supporte le fil f doit être constituée par la juxtaposition de pièces

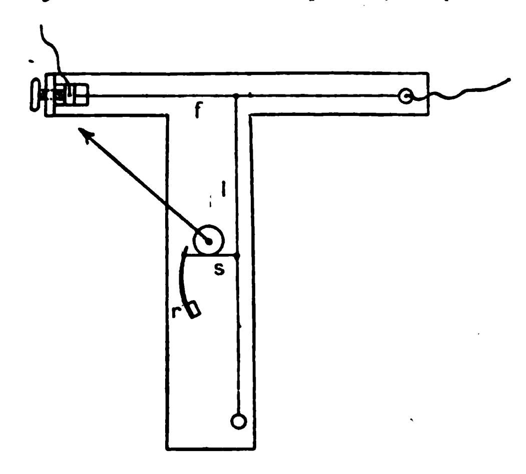


Fig. 99.

de laiton et de fer dont l'ensemble présente le même coefficient de dilatation que le platine-argent. De la sorte les variations de

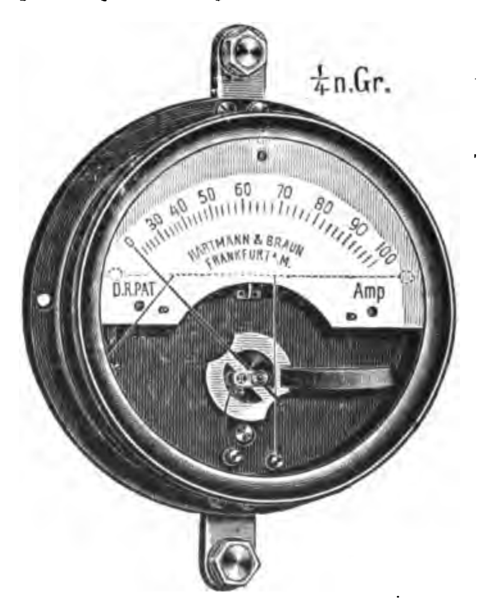


Fig. 100.

la température ambiante n'exercent pas d'influence perturbatrice. Une vis de rappel sert à tendre le fil dilatable pour ramener l'index au zéro. La fig. 100 montre l'aspect extérieur de l'appareil.

Le système mobile est pourvu d'un disque en aluminium qui tourne entre les pôles d'un aimant recourbé et assure l'amortissement des oscillations.

Les ampèremètres à dilatation sont entièrement à l'abri des influences électromagnétiques extérieures. Ils conviennent donc tout spécialement pour les tableaux de distribution et sont très utiles pour mesurer les courants alternatifs à cause de leur faible réactance.

Chapitre XI.

MESURE DES POTENTIELS BASÉE SUR LES MÉTHODES ÉLECTROSTATIQUES.

Mesure indirecte par l'électromètre absolu de Lord Kelvin. — Lord Kelvin a imaginé une méthode pour la détermination des potentiels sans l'emploi d'étalons de comparaison. La fig. 101 montre le principe de l'appareil utilisé. Un condensateur est formé par une armature fixe B et une armature A, dans laquelle on a

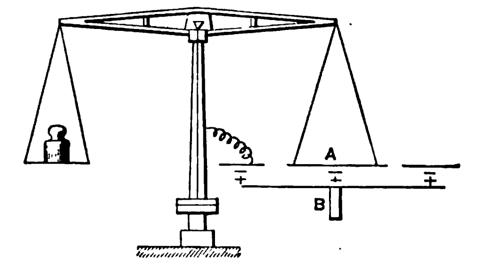


Fig. 101.

séparé, par une rainure étroite, un disque remplaçant l'un des plateaux d'une balance. Le disque est relié au corps dont on cherche le potentiel, tandis que l'armature inférieure est mise en communi-

cation avec le sol. Il faut tenir compte de ce fait que la liaison indiquée abaisse le potentiel du corps, si ce dernier n'est pas en communication avec une source d'électricité. En effet, la charge du corps se partage alors entre celui-ci et le disque proportionnellement aux capacités correspondantes. Il faut connaître ces capacités pour calculer la réduction du potentiel après la réunion. Les fils de liaison doivent être de capacité négligeable pour éviter une nouvelle correction. On emploiera, par exemple, des conducteurs minces supportés par des fils de soie et tenus à distance des corps conducteurs voisins.

En appelant V le potentiel électrique du disque suspendu en unités électromagnétiques, s la surface de ce dernier en cm^2 et r l'écartement des armatures en cm, la force attractive exercée sur l'équipage mobile est, en dynes,

$$p = \frac{V^2 s}{8 \pi K r^2},$$

où K représente $3^2 \times 10^{20}$.

On déduit de là

$$V = \sqrt{\frac{8 \pi K p r^2}{s}}.$$

Lord Kelvin a réalisé des balances très sensibles pour mesurer les attractions électrostatiques toujours faibles. Toutefois, ces appareils ne conviennent que pour l'évaluation des potentiels très élevés. Leur maniement est d'ailleurs délicat, ce qui a beaucoup restreint leurs applications. Ils peuvent servir pour étalonner des appareils à graduation empirique destinés à la mesure des hauts voltages.

Les électromètres en usage courant sont employés pour des méthodes de mesure relatives.

Principe de l'électromètre à quadrants utilisé à la mesure directe des potentiels. — Un cylindre de cuivre c c est divisé en quatre parties A, B, C, D, fig. 102 et 103. Les quadrants opposés sont reliés entr'eux à l'aide de fils conducteurs. Un autre fil mince supporte librement deux palettes cylindriques réunies à la partie supérieure et à la partie inférieure par des entretoises métalliques.

Les déviations du cadre E ainsi formé sont observées par réflexion. Dans sa position normale, le plan de symétrie du cadre passe par une des lignes de séparation des quadrants.

Supposons qu'on relie le cadre au sol par l'intermédiaire du fil de suspension et qu'on porte les deux paires de quadrants à des potentiels égaux et contraires. Le cadre s'électrise par influence ; il est sollicité également dans les deux sens et reste immobile.

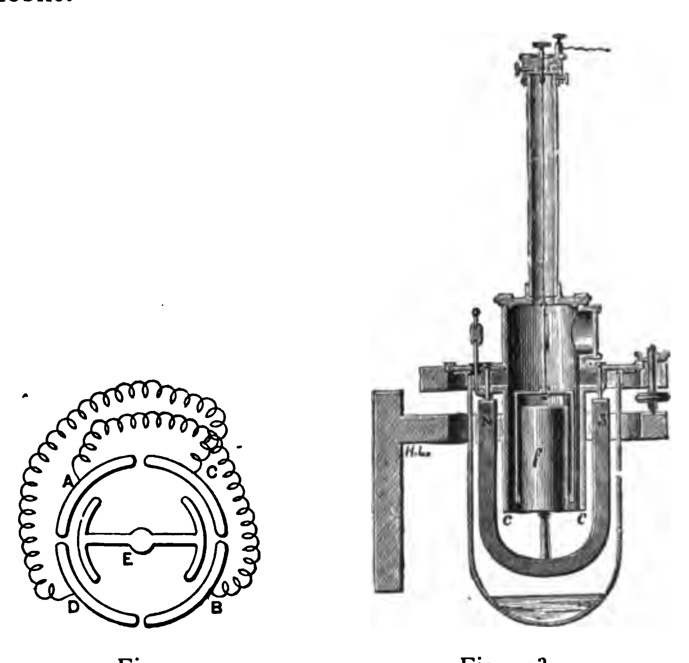


Fig. 102. Fig. 103.

Si le cadre reçoit une charge positive, il se déplace aussitôt vers les quadrants négatifs. Si sa charge est négative, la déviation est dirigée du côté des quadrants positifs.

Le cadre constitue un condensateur avec chacune des paires de quadrants. Appelons V le potentiel du cadre, V_1 celui des quadrants A et B, V_2 celui des quadrants C et D.

La charge du condensateur E — A, B est proportionnelle à la différence des potentiels $V - V_1$; la composante horizontale de la force qui tend à déplacer le cadre vers les quadrants considérés

peut être représentée par $a\,(V - V_1)^2$, a étant un coefficient constant, si le déplacement est assez faible pour que la capacité du conducteur puisse être considérée comme invariable. Le cadre est sollicité dans la direction opposée par une force égale à $a\,(V - V_2)^2$, la constante a étant la même, eu égard au faible déplacement du cadre et à l'identité de forme des quadrants. La résultante des deux actions est

$$a\,(V_2 - V_1)\,(2\,V - V_1 - V_2).$$

Son moment est équilibré par le couple de torsion du fil. On peut donc écrire

$$\theta = k\,(V_2 - V_1)\left(V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right).$$

M. Gouy a montré que la formule précédente est en défaut lorsque les potentiels des quadrants sont considérables relativement à celui de l'aiguille. Il existe alors un couple directeur électrique qui agit en même temps que le couple de torsion et dont l'action doit entrer en ligne de compte (¹).

Il faut remarquer en outre que, si l'aiguille n'est pas de même métal que les quadrants, il naît une différence de potentiel de contact qui altère les résultats et qu'on élimine en faisant deux expériences successives dans lesquelles la différence de potentiel parasite produit des effets égaux et contraires. La moyenne des déviations obtenues constitue le résultat cherché.

Dans l'emploi de l'électromètre à quadrants, divers cas sont à considérer qui permettent de simplifier la formule générale ci-dessus.

1° Dans l'hypothèse, faite au début, où les quadrants sont maintenus à des potentiels égaux et opposés, $V_1 = -V_2$, ce qu'on peut obtenir en les reliant aux deux pôles d'une pile bien isolée, d'un nombre pair d'éléments, le milieu de la série des éléments étant mis à la terre, on a

$$\theta = 2\,k\,VV_2. \qquad (1)$$

La déviation est proportionnelle au potentiel du cadre.

(¹) *Journal de physique*, t. VII, 1888.

2° Lorsque le potentiel de l'aiguille est très grand relativement à ceux des quadrants, la formule se réduit à

$$\theta = k\,(V_2 - V_1)\,V. \qquad (2)$$

3° Si l'on fait communiquer le cadre avec l'une des paires de quadrants, C, D par exemple, on a

$$V = V_2$$

d'où

$$\theta = k\,(V - V_1)\left(V - \frac{V + V_1}{2}\right) = \frac{k}{2}\,(V - V_1)^2. \qquad (3)$$

La déviation est alors proportionnelle au carré de la différence des potentiels du cadre et de A, B.

Les formules (1) et (2) peuvent être employées pour déterminer une différence de potentiel constante. Pour faire usage de la formule (1), le cadre est d'abord mis en communication avec l'un des pôles d'une pile étalon dont l'autre pôle est relié au sol. La déviation obtenue θ est proportionnelle à la force électromotrice e de la pile étalon

$$\theta = Ae.$$

On répète l'expérience en mettant les deux points dont on cherche la différence de potentiel en relation l'un avec la terre et l'autre avec le cadre mobile. La nouvelle déviation θ' est liée à la différence de potentiel V cherchée par la formule

$$\theta' = A\,V;$$

d'où

$$V = \frac{\theta'}{\theta}\,e.$$

Pour électriser les quadrants, on se sert de petits éléments de pile à un liquide, constitués au moyen d'éprouvettes ou de godets maintenus dans un lit de paraffine. On peut employer encore de petits couples secondaires formés de fils en plomb plongeant dans une solution sulfurique au dixième. On réalise ainsi sous un petit volume des piles produisant de hauts potentiels.

Au lieu de procéder comme il vient d'être dit, on peut charger le cadre mobile à un potentiel élevé, par exemple en le mettant en

communication métallique avec une pile auxiliaire d'un grand nombre d'éléments, le pôle libre de cette pile étant relié au sol. Lord Kelvin a employé avec ses électromètres à quadrants une petite machine électrostatique appelée replenisher [1], capable d'électriser l'aiguille à un potentiel très élevé.

On connecte successivement les deux pôles de la pile étalon et les deux points dont on cherche la différence de potentiel aux paires de quadrants et l'on applique la formule (2).

Par suite de la faible intensité des forces électrostatiques, l'électromètre est un appareil peu sensible. Il n'est plus guère employé que pour la mesure des différences de potentiel élevées, avec lesquelles les méthodes électromagnétiques présentent des inconvénients. Pour la mesure des forces électromotrices minimes, ces dernières méthodes sont au contraire plus exactes et plus commodes.

Pour l'évaluation des grandes différences de potentiel, on fait usage de la formule (3). On relie le cadre à l'une des paires de quadrants et l'on compare la différence de potentiel cherchée V à une différence de potentiel connue.

On a

$$\theta = B\,V^2,$$

$$\theta' = B\,e^2;$$

d'où

$$V = e\sqrt{\frac{\theta}{\theta'}}.$$

Lorsque la différence de potentiel à mesurer varie périodiquement de sens, comme c'est le cas entre les extrémités d'un conducteur parcouru par des courants alternatifs, la déviation est proportionnelle au carré moyen de V, et, par suite,

$$V_{eff} = e\sqrt{\frac{\theta}{\theta}}.$$

---

(1) Voir Eric Gerard, *Leçons sur l'Electricité ;* t. I, chap. VII.

Modèles d'électromètres à quadrants de Lord Kelvin, de M. Edelmann, de M. Mascart et de l'auteur. Voltmètres électrostatiques de Lord Kelvin, de MM. Ayrton et Mather et de M. Rowland. — La fig. 103 représente l'électromètre à quadrants de M. Edelmann, modifié par l'auteur afin de rendre le mouvement du cadre apériodique.

Dans ce but, les quadrants sont embrassés par un aimant en fer à cheval N S, dont les lignes de force sont concentrées par une pièce en fer doux *f*. Le cadre se termine à la partie inférieure par une entretoise en forme d'anneau qui joue librement autour de *f*. Les courants induits développés dans le cadre pendant le mouvement de celui-ci amortissent complètement ses oscillations. Au fond de l'enveloppe en verre qui entoure l'électromètre, on verse de l'acide sulfurique concentré destiné à dessécher l'atmosphère de l'appareil. Les lectures se font par réflexion.

L'électromètre de M. Edelmann présente l'inconvénient de ne pas permettre le déplacement des quadrants pour corriger éventuellement un léger défaut de symétrie du cadre, défaut qui amène une déviation lorsque celui-ci est électrisé et que les quadrants sont à l'état neutre. L'auteur a obvié à cet inconvénient en utilisant la disposition décrite à propos de son galvanomètre différentiel. Il lui a suffit de remplacer la bobine de ce dernier par un cadre en aluminium, analogue à celui de l'électromètre précédent, et de fixer les quadrants aux pièces polaires mobiles, recouvertes au préalable d'une chemise isolante, fig. 104. Le noyau en fer qui a pour but de concentrer les lignes de force de l'aimant dans l'espace où se meut le cadre, en vue d'amortir les oscillations de ce dernier, est également revêtu d'une enveloppe isolante et porte quatre quadrants disposés en regard des quadrants extérieurs et reliés à ceux-ci deux à deux, de manière à renforcer leur action.

Les appareils décrits plus haut ne conviennent que pour la mesure de la force électromotrice des piles ou des dynamos capables de restituer constamment l'électricité qui se perd par les supports des pièces métalliques. Pour mesurer les potentiels des charges statiques, il est nécessaire d'employer des précautions toutes spéciales pour assurer l'isolement de ces pièces. Il faut les fixer à des colonnettes de verre bien propres, placées dans une atmosphère desséchée par l'acide sulfurique.

La fig. 105 montre le modèle d'électromètre de Lord Kelvin modifié par M. Mascart. Les précautions signalées sont observées. Les

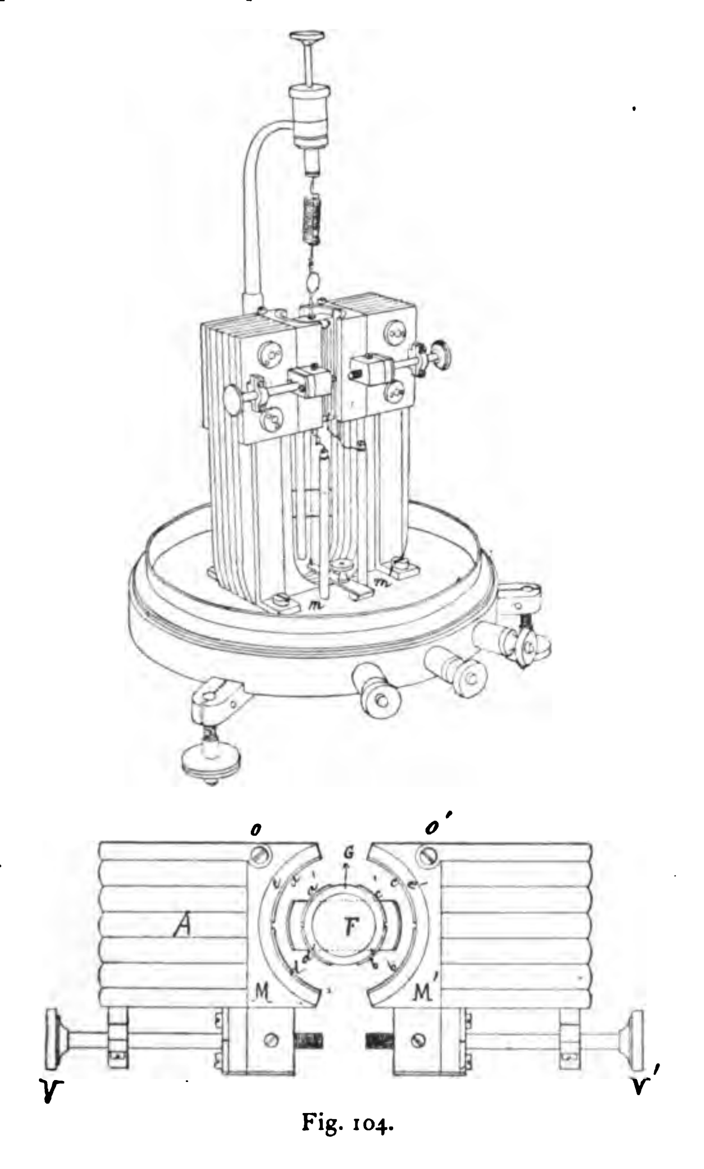


Fig. 104.

quadrants sont découpés dans une boîte de laiton cylindrique et aplatie. La palette mobile, profilée en forme de 8 dont les lobes

sont évidés, est suspendue à l'intérieur de cette boîte. Elle est supportée par un bifilaire en soie et se prolonge sous les quadrants par un fil de platine auquel sont attachés le miroir destiné aux lectures et un croisillon plongeant dans une coupe pleine d'acide sulfurique. Outre son action desséchante, celui-ci amortit les mouvements de la pièce mobile et permet de la mettre en communication électrique avec l'extérieur.

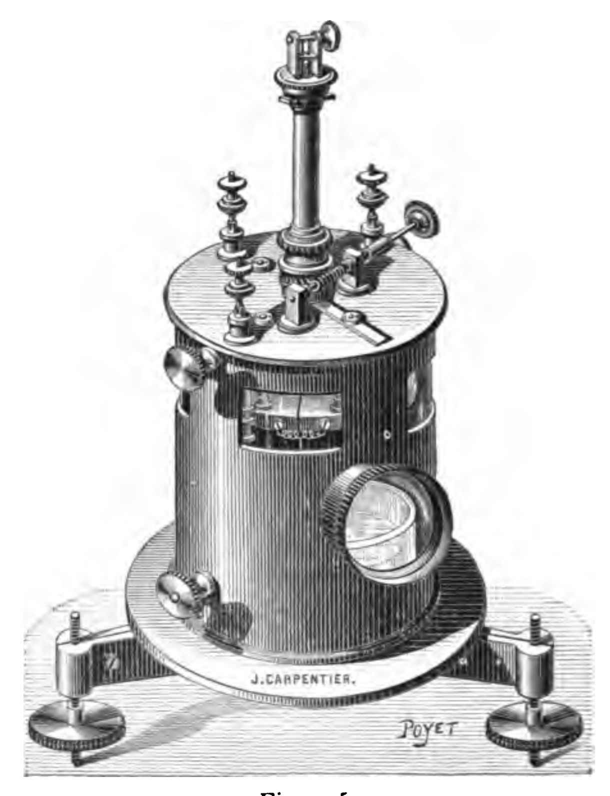


Fig. 105.

Pour mesurer les différences de potentiel très élevées fournies par les dynamos et particulièrement par les alternateurs, on adopte des électromètres à lecture directe, gradués en volts, qu'on désigne parfois sous le nom de voltmètres électrostatiques.

Dans ces appareils, qui sont toujours basés sur l'emploi de la formule (3), on supprime l'une des paires de quadrants.

Lord Kelvin a combiné, pour la mesure des tensions de 40 à 800 volts, un instrument appelé voltmètre multicellulaire et formé d'une série de quadrants superposés qui agissent sur des palettes

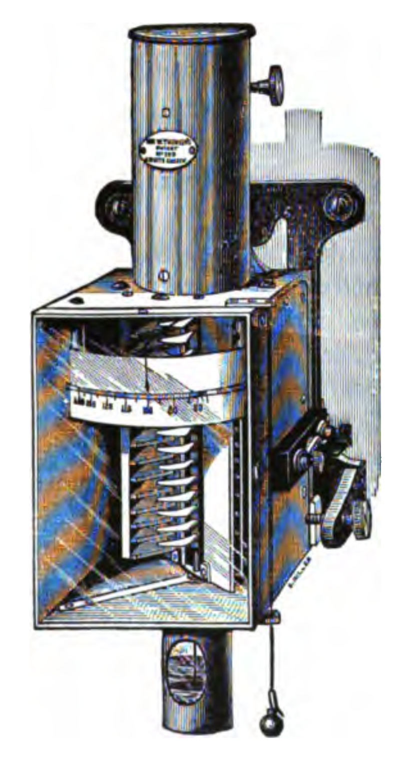


Fig. 106.

mobiles supportées par un fil métallique mince, fig. 106. Un index en aluminium, se déplaçant devant une graduation, sert aux lectures. L'amortissement est assuré par un disque porté par les palettes mobiles et baignant dans un liquide.

Dans le voltmètre électrostatique de MM. Ayrton et Mather, deux paires de segments cylindriques fixes en laiton attirent deux palettes en aluminium, également en forme de segments de cylindre, pivotant autour d'un axe vertical auquel est attaché l'index. Un ressort spiral

en métal non magnétique est utilisé comme force directrice. Les segments fixes sont reliés à l'une des bornes de l'appareil, les segments mobiles à l'autre. Des fils de sûreté en platine-argent, de 0,02 mm de diamètre et tendus par de petits ressorts dans des tubes en verre, sont insérés dans les conducteurs de liaison. Les bornes d'attache sont recouvertes de manchons en ébonite pour prévenir les accidents. Pour préserver l'appareil contre les tensions excessives, un intervalle d'air restreint sépare les connexions, de manière à favoriser éventuellement la production d'une étincelle et la fusion des coupe-circuits de sûreté.

Des précautions de ce genre doivent toujours être prises avec les voltmètres à hauts voltages.

MM. Ayrton et Mather ont remarqué qu'un frottement contre le couvercle des voltmètres amène parfois une électrisation du verre capable de fausser les indications. En vue de se mettre à l'abri de cette cause d'erreur, ils recouvrent le verre d'un vernis rendu conducteur par de l'acide sulfurique. Il suffit d'ailleurs de couvrir le verre de vapeur d'eau par expiration après l'avoir nettoyé, pour éviter cet effet parasite.

Voici un autre type d'instrument employé pour la mesure des hauts voltages.

Une bande métallique est suspendue à un fil conducteur entre deux plateaux verticaux parallèles. La bande et les plateaux sont portés à la différence de potentiel inconnue. La bande tend à se placer normalement aux plateaux. Le couple déviant est équilibré par le couple de torsion du fil de suspension. L'angle de déviation se lit sur une échelle par la méthode de réflexion.

Dans quelques laboratoires, l'étalonnage des électromètres pour tensions élevées s'opère à l'aide de petits éléments secondaires disposés en série. Avec des fils de plomb plongeant dans des éprouvettes à eau acidulée, on peut constituer des piles donnant 10 000 volts et au-delà sous un volume assez réduit. On mesure séparément la force électromotrice des différents groupes d'éléments. Ces piles d'essai doivent être parfaitement isolées. Elles sont portées sur des étagères fixées sur isolateurs. Une semblable pile peut être employée pour vérifier le pouvoir diélectrique des corps isolants.

On peut amplifier la tension fournie par la pile en chargeant à l'aide de celle-ci des condensateurs très bien isolés, qu'on groupe ensuite en cascade, de manière à cumuler les différences de potentiel des armatures. Inversement, si l'on veut mesurer des potentiels très élevés à l'aide d'un électromètre dont la marge n'est pas suffisante, on peut charger les condensateurs en cascade et les relier ensuite en parallèle à l'électromètre. Si tous les condensateurs sont identiques, il suffit de réunir l'électromètre à l'un d'eux pendant que les extrémités de la série communiquent avec les points dont on cherche la différence de potentiel (¹).

L'emploi des voltmètres électrostatiques exige une correction pour la force électromotrice de contact. Celle-ci est de 0,5 volt si l'équipage mobile est en aluminium et les quadrants en cuivre. La correction est positive ou négative suivant que les quadrants sont électrisés positivement ou négativement.

M. Rowland est arrivé à soumettre les voltmètres électrostatiques à de très hautes tensions, sans courir le risque de provoquer des étincelles entre les pièces électrisées, en immergeant l'appareil dans l'huile. Celle-ci a, en outre, pour effet d'accroître la capacité et par suite les charges agissantes.

Electromètre capillaire de M. Lippmann. — Un tube vertical T terminé par une pointe capillaire et contenant du mercure plonge dans une éprouvette remplie d'eau acidulée de $^1/_6$ d'acide sulfurique. Une couche de mercure déposée au fond de l'éprouvette étant mise en communication avec le pôle positif d'un élément de pile Daniell par une électrode en platine P, tandis que le mercure du tube est relié au pôle négatif par une seconde électrode S, on constate aussitôt un relèvement du niveau du mercure dans la pointe capillaire. Cette dénivellation cesse dès que les deux électrodes sont réunies directement entre elles.

Dans les limites de tension qui précèdent la décomposition, ce

(¹) *Bull. de l'Ass. des ing. électr. sortis de l'Institut Montefiore*, 1891.



Fig. 107.

phénomène, observé à l'aide du microscope, est susceptible d'accuser des différences de potentiel de 0,0001 volt et, par suite, de servir de base à un électromètre particulièrement utile dans les méthodes de zéro, où l'on doit équilibrer des différences de potentiel faibles. Lorsqu'on applique l'appareil à la mesure de forces électromotrices plus grandes, mais nécessairement inférieures à 1 volt, on équilibre la tension due à la polarisation par une pression exercée sur la colonne de mercure au moyen d'une poire en caoutchouc et estimée à l'aide d'un manomètre à mercure T'. Il faut avoir soin de mettre l'électrode S à un potentiel inférieur à celui de l'électrode P, sinon le ménisque capillaire serait polarisé par l'oxygène et la surface du mercure serait altérée.

Au lieu de produire l'abaissement du ménisque à l'aide d'une poire en caoutchouc qui durcit à la longue, il est préférable, comme l'a suggéré M. Limb, de faire communiquer latéralement le tube principal, qui sert alors de manomètre, avec un réservoir à mercure qu'on élève lorsqu'on veut accroître la pression. Les mesures terminées, on descend suffisamment le réservoir pour faire remonter l'eau jusque dans la partie élargie de la pointe, ce qui évite l'altération du mercure dans celle-ci.

Chapitre XII.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Méthodes indirectes. — Lorsqu'il s'agit de mesurer la force électromotrice des générateurs électriques et de déterminer la différence entre les potentiels de deux points d'un conducteur parcouru par un courant, on peut recourir à des méthodes basées sur l'emploi des galvanomètres.

Considérons le dernier cas et supposons que le courant soit continu et d'intensité constante.

A défaut d'étalon de force électromotrice, il est possible d'employer des méthodes de mesure absolues.

1. On détermine séparément l'intensité du courant au moyen d'un galvanomètre et la résistance comprise entre les points dont on cherche la différence de potentiel. Le produit des deux valeurs numériques représente la grandeur cherchée.

2. On charge les armatures d'un condensateur étalon en les réunissant aux deux points considérés, et l'on décharge ensuite le condensateur dans un galvanomètre balistique, dont on a déterminé la durée d'oscillation sans amortissement T_0 et la constante permanente k. On a, en appelant c la capacité du condensateur,

V la différence de potentiel cherchée et α_1 l'élongation première du galvanomètre,

$$q = cV = \frac{T_0}{\pi}\frac{1}{k}\alpha_1\, e^{\frac{\lambda}{\pi}\operatorname{arc\,tang}\frac{\pi}{\lambda}},$$

d'où l'on déduit la valeur de V.

En prenant la différentielle logarithmique de l'expression de cette valeur et en négligeant la correction pour l'amortissement, il vient

$$\frac{dV}{V} = \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} - \frac{dk}{k} - \frac{dc}{c}.$$

Si toutes les erreurs s'ajoutent, l'erreur relative limite du résultat est

$$\frac{dV}{V} = \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} + \frac{dk}{k} + \frac{dc}{c}.$$

On voit qu'il est difficile d'estimer V avec exactitude par cette méthode.

Méthodes directes. Méthode de déviation. — Le plus souvent, on détermine les différences de potentiel par comparaison avec la force électromotrice d'une pile étalon ; ce procédé permet une exactitude plus grande que la méthode précédente.

Au lieu de calculer la constante balistique du galvanomètre, on élimine celle-ci en chargeant, dans une seconde expérience, le condensateur à l'aide de la pile étalon de force électromotrice e.

On obtient ainsi les relations

$$q = cV = \frac{\alpha_1}{K},$$

$$q' = ce = \frac{\alpha'_1}{K};$$

d'où

$$V = e\,\frac{\alpha_1}{\alpha'_1}.$$

Les connexions sont établies par l'intermédiaire d'une clef de décharge C, comme l'indique la *fig.* 108. On se sert de la clef

d'inversion pour obtenir des élongations de part et d'autre du milieu de l'échelle et éliminer l'influence du déplacement du zéro.

Il faut avoir soin de relever la clef de décharge avant la clef d'inversion, car si l'on procède en sens inverse le condensateur se décharge par cette dernière.

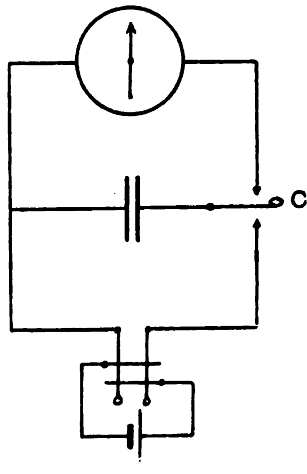


Fig. 108.

La différentielle logarithmique de l'expression précédente est

$$\frac{dV}{V} = \frac{de}{e} + \frac{d\alpha_1}{\alpha_1} - \frac{d\alpha'_1}{\alpha'_1}.$$

L'erreur relative limite sur V s'obtient en supposant que les erreurs de lecture s'ajoutent, c'est à dire en changeant le signe de $\frac{d\alpha'_1}{\alpha'_1}$. On se place évidemment dans les meilleures conditions, en faisant en sorte que les élongations soient maxima. Pour cela on choisit, dans un condensateur gradué, des capacités convenables. Il est possible de modifier les élongations en réglant un shunt disposé entre les bornes du galvanomètre, mais il faut alors tenir compte du terme correctif pour l'amortissement produit par le shunt.

Cette méthode, se pratiquant à circuit ouvert, a l'avantage de n'exiger qu'une dépense d'électricité négligeable ; à ce titre, elle se recommande spécialement pour la mesure de la force électromotrice des piles très polarisables.

Méthode du voltmètre. Voltmètres industriels. Cas des forces électromotrices alternatives. — Aux deux points dont on cherche la différence de potentiel, pôles d'une pile, bornes d'une dynamo ou extrémités d'un conducteur parcouru par un courant, on peut relier un galvanomètre auquel on ajoute une résistance assez grande pour que le courant qui passe dans l'appareil ne modifie pas, d'une manière appréciable, la différence de potentiel cherchée.

On obtient au galvanomètre une déviation α telle que

$$i = \frac{V}{r} = \frac{\alpha}{k},$$

r étant la résistance du galvanomètre et des bobines en série avec celui-ci.

En opérant de même avec un élément étalon e, on a

$$i' = \frac{e}{r} = \frac{\alpha'}{k},$$

d'où

$$V = e\frac{\alpha}{\alpha'}.$$

La discussion de cette méthode est analogue à celle de la méthode balistique précédente. La précision qu'on peut atteindre est plus grande que dans cette dernière parce que l'observation des déviations permanentes entraîne une erreur moindre que les lectures balistiques.

Si l'erreur de lecture s'élève à 0,01 par exemple, il faudra veiller à ce que le courant que débite la pile étalon ne modifie pas la force électromotrice de celle-ci au point d'occasionner une erreur du même ordre. Ainsi, avec l'élément Clark à vase poreux, on doit mettre en circuit une résistance de 100 000 ohms et l'on shunte le galvanomètre, si ce dernier est trop sensible.

Dans le cas où l'on utilise un galvanomètre à réflexion dont les indications sont proportionnelles aux courants, on facilite les observations, si celles-ci sont nombreuses, en réglant la résistance

additionnelle et le shunt de telle manière qu'une division représente un volt ou un multiple exact du volt. On réalise de la sorte un *voltmètre* qui permet la détermination des différences de potentiel par une simple lecture. On ne perdra pas de vue, en employant un tel instrument, que sa résistance doit être suffisamment grande pour que le courant qui le traverse ne modifie pas la différence de potentiel à mesurer.

Si celle-ci est prise aux extrémités d'un conducteur ayant 0,01 ohm de résistance, on ne commet qu'une erreur de 0,001 en faisant usage d'un voltmètre dont la résistance n'est que 10 ohms. Si, au contraire, on mesure la force électromotrice d'une pile dont la résistance intérieure est 5 ohms, le même appareil donne lieu à une forte erreur, puisque dans ces conditions la différence de potentiel aux bornes de la pile en circuit avec le voltmètre est non pas e, mais

$$e \times \frac{10}{15} = 0,67\, e.$$

Il ne faut pas oublier davantage que la graduation d'un voltmètre n'est correcte qu'à la condition expresse que la résistance de l'instrument soit invariable.

Pour éviter les modifications de résistance dues au courant ou aux variations de la température ambiante, il est recommandable de n'employer pour l'enroulement de ces instruments, ainsi que pour les shunts et les résistances en série, que des alliages, tels que le maillechort ou la manganine, sur lesquels les effets des changements de température sont faibles ou nuls. De plus, on aura soin de ne laisser passer le courant que pendant le temps nécessaire à la mesure, afin de ne pas occasionner d'échauffements excessifs.

On peut négliger l'influence de la température avec un galvanomètre à bobine en cuivre, si celle-ci a une résistance très faible comparativement aux résistances additionnelles, faites en maillechort ou en manganine.

Il est aisé d'étendre les limites d'emploi d'un voltmètre en y adjoignant des résistances en séric de manière à modifier la résistance totale du circuit de l'appareil. Si, à une résistance r, corres-

pond 1 division par volt, une résistance 10 r, obtenue en ajoutant 9 r en série, porte la valeur d'une division à 10 volts.

Lorsqu'on se sert du galvanomètre Deprez et d'Arsonval comme voltmètre, il est nécessaire d'utiliser un shunt, afin d'amortir les oscillations, à moins qu'on n'ait enroulé la bobine sur un cadre en aluminium, dans lequel se développent des courants amortisseurs. On peut agir sur le shunt pour modifier la sensibilité du voltmètre. Avec une bobine mobile en maillechort enroulée sur un cadre d'aluminium et quelques résistances en série et en dérivation également en maillechort, on est à même de mesurer tous les voltages usités dans les applications. Une telle disposition peut être employée pour graduer les voltmètres industriels pour courants continus.

Dans l'industrie électrique, on a continuellement à mesurer des différences de potentiel. On se sert, à cet effet, de voltmètres industriels à lecture directe, gradués en volts.

On utilise dans leur construction toutes les dispositions préconisées pour les ampèremètres, en ayant soin de tenir compte des conditions spéciales énoncées ci-dessus. Comme, en général, ces diverses combinaisons ne procurent pas une grande sensibilité, on utilise une bobine en fil de cuivre comportant beaucoup d'ampères-tours et l'on emploie une résistance additionnelle en maillechort, en manganine ou en constantan.

Souvent les voltmètres n'ont à marquer exactement qu'entre des limites peu écartées. Ainsi, dans les distributions à 110 volts pour l'alimentation des lampes à incandescence, on exige simplement que l'instrument soit sensible aux environs de la tension normale, où une différence de voltage de 0,01 occasionne une variation de l'intensité lumineuse de 0,05.

Lorsqu'on a affaire à des tensions très élevées, l'énergie absorbée par le voltmètre est importante à considérer si l'appareil doit rester en circuit, comme c'est le cas sur les tableaux de distribution. Il faut alors chercher des instruments aussi sensibles que possible, qui fonctionnent avec des courants très faibles. Les voltmètres électrostatiques sont les plus recommandables sous ce rapport, puisqu'avec eux la dépense d'énergie est nulle. On peut, comme on l'a vu au chapitre précédent, relier ces volt-

mètres à un des éléments d'une batterie de condensateurs mis en série ou en cascade, la source de force électromotrice étant reliée aux extrémités de la série.

Dans le cas particulier des forces électromotrices alternatives, les voltmètres à aimant ne conviennent pas. Il faut employer des appareils à fer doux, en ayant soin d'éliminer autant que possible les courants de Foucault dans la palette mobile, des appareils à dilatation, des électrodynamomètres ou des appareils électrostatiques. Outre qu'ils doivent satisfaire aux conditions imposées aux voltmètres à courant continu, ces appareils ne peuvent présenter qu'une self-induction négligeable, afin que le courant qui les traverse soit en concordance de phase avec la différence de potentiel à mesurer. Dans les appareils à bobines, on arrive à satisfaire approximativement à cette nécessité, en enroulant aussi peu de spires que possible sur les bobines et en ajoutant en série avec celles-ci une grande résistance à double enroulement.

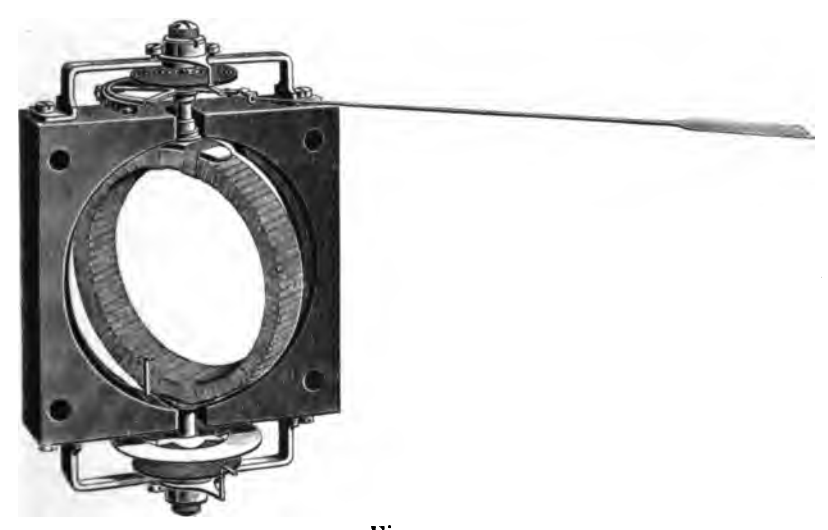


Fig. 109.

M. Evershed évite toute correction en ce qui concerne la fréquence du courant en dérivant sur la résistance non inductive un petit condensateur de capacité convenable.

Afin d'éviter l'emploi de voltmètres très résistants pour mesurer les tensions alternatives élevées, on se contente parfois de réduire cette tension par le moyen d'un petit transformateur. Il faut alors régler l'appareil pour la fréquence requise.

La fig. 109 montre un modèle d'électrodynamomètre conçu par M. Weston pour servir de voltmètre avec les courants alternatifs. Le mode de fixation et de direction de la bobine mobile est le même que dans l'ampèremètre de ce constructeur. L'arrêt des oscillations du cadre mobile est provoqué par une pièce frottant sur un disque que porte l'axe de rotation. On détermine ce frottement amortisseur en poussant sur un bouton.

Méthodes de zéro. Méthode d'opposition de Poggendorff. Potentiomètres de Clark, de Crompton et d'Arnoux. Pont de compensation de Feussner. — Nous examinerons avec quelques détails la méthode d'opposition qui compte parmi les plus fécondes et les plus précises. Le principe en a été indiqué par Poggendorff, mais elle a reçu de divers électriciens des perfectionnements qui forment la base d'appareils, appelés indifféremment potentiomètres ou ponts de compensation, qui sont d'une haute utilité dans les laboratoires. Ces appareils qui comportent des résistances et des forces électromotrices étalons sont propres aussi bien à la comparaison des différences de potentiel qu'à celle des intensités de courant ; ils conviennent même à la comparaison des résistances.

Les méthodes de zéro que nous allons passer en revue procurent une exactitude plus grande que les méthodes de déviation, parce qu'elles utilisent le galvanomètre au voisinage de la position de repos de l'équipage mobile et qu'elles permettent par suite de donner à l'instrument toute sa sensibilité, tandis que, dans les méthodes par comparaisons successives, on est ordinairement obligé d'atténuer la sensibilité du galvanomètre par des shunts. Les méthodes de zéro rendent possible l'emploi d'un galvanomètre dont la loi n'est pas connue. Pour fixer les idées, nous supposerons dans ce qui suit qu'il s'agit de déterminer la force électromotrice d'une pile par comparaison avec celle d'un élément étalon.

Soient e et e' les forces électromotrices des piles comparées. On

met en circuit la pile de force électromotrice la plus grande, que nous supposerons peu polarisable, avec deux résistances variables, r, r' et l'on règle celles-ci jusqu'à ce qu'un galvanomètre mis en série avec l'autre pile, comme l'indique la fig. 110, ne dévie plus.

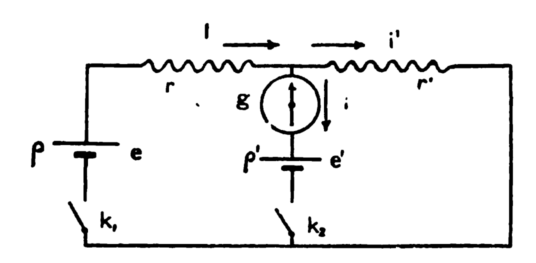


Fig. 110.

On abaisse la clef k_1 d'abord, puis la clef k_2 et l'on relève les deux clefs, en commençant par k_2 aussitôt qu'on a constaté une déviation.

En appelant ρ et ρ' les résistances des deux piles, on trouve par l'application des lois de Kirchhoff

$$I = i + i'$$
$$e = I(r + \rho) + i' r'$$
$$e' = i' r' - i(\rho' + g);$$

d'où, en éliminant i' et I,

$$i = \frac{er' - (r + \rho + r')e'}{r(r + \rho) + (\rho' + g)(\rho + r + r')} = \frac{\alpha}{k}. \qquad (1)$$

Lorsque la déviation α s'annule, $i = 0$, d'où

$$\frac{e}{e'} = n = \frac{r + \rho + r'}{r'}. \qquad (2)$$

En supposant r constant et r' variable, on déduit de (2)

$$\frac{dn}{n} = \frac{(r + \rho)\,dr'}{(r' + \rho + r)\,r'}.$$

Cette valeur est minima quand r' et par suite r ont leurs plus grandes valeurs, ces deux quantités étant liées par la relation

$$r = r'(n - 1) - \rho.$$

Lorsqu'on dispose d'un galvanomètre sensible, on choisit les résistances r et r' assez élevées pour qu'une variation de r' égale à 1 ohm n'occasionne qu'une faible déviation. On peut alors, en général, négliger la résistance intérieure ρ et la valeur de $\frac{dn}{n}$ est inférieure à $\frac{r}{(r'+r)\,r'}$.

Si des résistances r' et $r'+1$ donnent des déviations α et α' de sens opposés, on peut, à la condition que les courants i' produisant ces écarts soient peu différents, employer la formule d'interpolation et admettre que la résistance correspondant au zéro du galvanomètre est $r' + \frac{\alpha}{\alpha+\alpha'}$. En effet, on a, dans ce cas, pour la résistance $r'+1$,

$$i'(r'+1) - e' = \frac{\alpha'}{k} g$$

en admettant que g soit la seule résistance à considérer dans le circuit du galvanomètre.

Pour la résistance r', on obtient

$$i' r' - e' = -\frac{\alpha}{k} g.$$

De là, on déduit

$$\frac{i'(r'+1) - e'}{i'r' - e'} = -\frac{\alpha'}{\alpha};$$

d'où

$$\frac{i'}{i'r' - e'} = -\frac{\alpha+\alpha'}{\alpha},$$

et

$$r' + \frac{\alpha}{\alpha+\alpha'} = \frac{e'}{i'}.$$

On peut discuter ce résultat en faisant intervenir les erreurs de lecture.

Si la variation du courant i' était sensible dans les deux essais, la formule serait en défaut. Il faudrait alors disposer entre les boîtes r et r' un fil à curseur permettant d'obtenir l'équilibre parfait au galvanomètre.

Si l'on veut dans ces conditions connaître l'influence d'une erreur de lecture, on considérera α comme variable dans l'équation (1), qui devient, en supposant ρ et ρ' négligeables,

$$i = \frac{n\,e'r' - (r + r')\,e'}{r^2 + g\,(r + r')} = \frac{\alpha}{k};$$

on trouve, en introduisant la condition (2),

$$\frac{dn}{n} = \frac{d\alpha}{k}\,\frac{r^2 + g\,(r + r')}{e'\,(r + r')}.$$

Il faudra se souvenir que la constante k est ordinairement rapportée au micro-ampère, alors que, dans la formule précédente, elle est liée à l'ampère, c'est à dire 1 000 000 de fois plus grande. La formule montre qu'on doit choisir un galvanomètre aussi sensible que possible.

Lorsque la pile e' est très sujette à se polariser, comme c'est le cas pour l'élément Clark, on commence le réglage en introduisant en série avec le galvanomètre une grande résistance qu'on diminue progressivement à mesure qu'on approche de l'équilibre. Lorsque ce dernier est atteint, on laisse reposer la pile, pour faire disparaître toute trace de polarisation ; après quoi l'on vérifie si l'équilibre se maintient.

Si la pile non polarisable a une force électromotrice e inférieure à e', on réunit plusieurs éléments en série, après s'être assuré, par une mesure préalable, que les divers éléments donnent la même force électromotrice.

Ainsi, pour comparer l'élément Daniell à l'élément Clark à vase poreux, on utilise deux couples du premier type ; on a d'ailleurs soin d'introduire une résistance de 100 000 ohms en série avec l'étalon Clark pour commencer le réglage.

Quand on ne dispose pas de résistances r et r' assez grandes pour permettre de négliger la résistance ρ, on établit un second régime

d'équilibre en ajoutant respectivement à r et r' des résistances r_1 et r'_1.

On aura ainsi une nouvelle relation

$$\frac{e}{e'} = \frac{r' + r'_1 + \rho + r + r_1}{r' + r'_1}. \qquad (3)$$

De la comparaison des équations (2) et (3) on déduit

$$\frac{e}{e'} = \frac{r'_1 + r_1}{r'_1}.$$

Il faut avoir soin de tenir la clef de la pile principale abaissée assez longtemps pour que celle-ci ait le temps de prendre son régime permanent.

Pour éviter l'élément d'incertitude qu'apportent la variation de la force électromotrice de la pile principale et la résistance de celle-ci, on utilise de préférence en e une pile auxiliaire, qui peut être formée de quelques éléments secondaires de résistance négligeable, qu'on maintient en circuit pendant un temps convenable, et l'on introduit en e' successivement les deux éléments e' et e'_1 dont les forces électromotrices doivent être comparées. Si e' est un étalon Weston, de force électromotrice égale à 1,019 volt, on commence par déboucher une résistance r' dont la valeur numérique en ohms est un multiple de e', soit 1 019 ohms, et l'on cherche la résistance r qui ramène le galvanomètre au zéro. On substitue alors à l'élément étalon la pile inconnue e'_1 et l'on règle les résistances correspondantes r'_1 et r_1 de telle manière que la somme $r_1 + r'_1 = r + r'$ et que le courant fourni par e ne varie pas.

On a alors

$$e'_1 = e' \frac{r'_1}{r'} = \frac{r'_1}{1\,000}.$$

On se trouvera bien de l'emploi de deux boîtes de résistance de 10 000 ohms pour le réglage, une résistance de 100 000 ohms étant mise en série avec l'élément étalon au début des tâtonnements.

Dans le potentiomètre de Clark, la comparaison des forces électromotrices est ramenée à celle de deux longueurs.

Une pile ou un accumulateur auxiliaire E, capable de fournir un courant constant, est placé en circuit avec un rhéostat *a* et un conducteur résistant, relié aux points A et B. Les deux piles *e* et *e* à comparer sont mises en dérivation avec des galvanomètres sur une

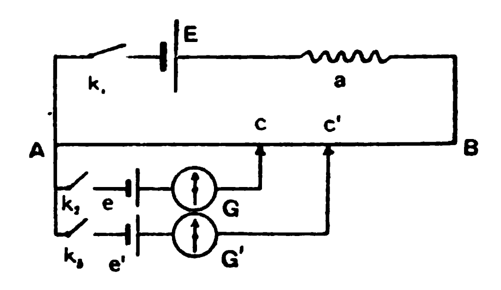


Fig. 111.

partie de la résistance A B. On règle la position des contacts à curseur c et c' jusqu'à ce que les galvanomètres G et G′ reviennent au zéro. En désignant par i le courant débité par la pile E, par r et r' les résistances A c et A c', on a

$$e = ir$$

$$e' = ir'$$

d'où

$$\frac{e}{e'} = \frac{r}{r'}.$$

Il est facile de voir que la précision de la mesure dépend de l'approximation avec laquelle on peut évaluer les résistances r et r', laquelle est liée elle-même à la sensibilité des galvanomètres et à la plus petite fraction appréciable de la résistance du conducteur A B.

Pour effectuer la mesure, on commence par régler la position du curseur c en observant le galvanomètre G, puis celle du curseur c' à l'aide du galvanomètre G′. On pourrait se passer du galvanomètre G′, puisque, si la position du curseur c' n'est pas réglée, un courant traverse G au moment où l'on abaisse la clef k_3,

grâce à la variation de potentiel que le courant passant par e' détermine en c. Cependant, on obtient plus de sensibilité avec deux instruments.

Si l'on ne dispose que d'un appareil, il est préférable de placer successivement les deux piles à comparer dans le même circuit dérivé et de régler les positions du curseur jusqu'à obtenir l'équilibre dans les deux cas. Ce procédé suppose que le courant de la pile E est resté invariable. Pour s'en assurer, on dispose une clef permettant de substituer rapidement la pile e' à la pile e et l'on alterne les opérations.

Dans le potentiomètre de Clark, modifié par Crompton, la résistance A B est formée par un long fil calibré et tendu suivant une règle divisée. Comme la mesure peut entraîner une erreur relative assez forte, lorsque la longueur du fil n'est pas très grande, M. Crompton dispose à la suite du fil 14 bobines de même résistance que ce dernier et ne se sert du fil que pour achever le réglage réalisé d'une manière grossière avec les bobines.

Le fil calibré est divisé en 1 000 parties d'égale résistance, dans lesquelles une pile a maintient un courant constant, fig. 112. On règle le courant à l'aide d'un rhéostat à plots G et d'un rhéostat continu G I, de manière que la différence de potentiel totale aux

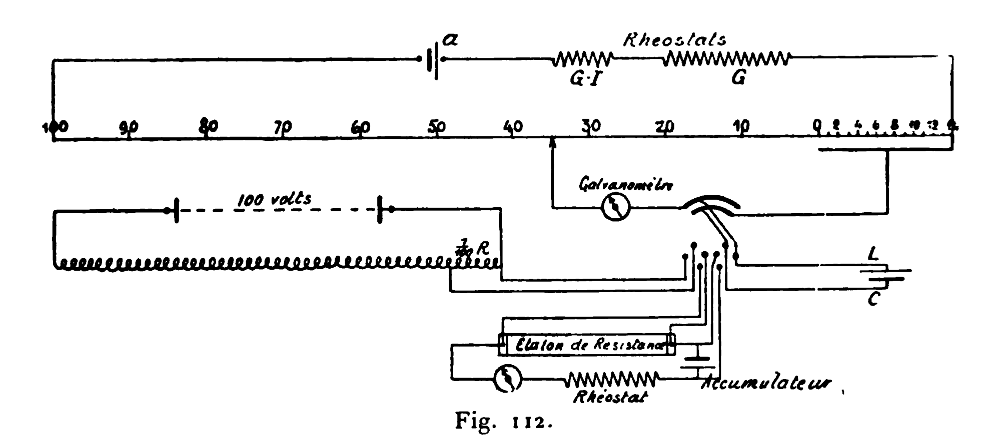


Fig. 112.

extrémités des 14 bobines et du fil divisé soit 1,5 volt; dans ces conditions, la différence de potentiel correspondant à 1 division est

0,0001 volt. On arrive à ce résultat en se servant d'un élément Clark à vase poreux L C, dont la force électromotrice à 15° est 1,434 volt. On règle les rhéostats de telle sorte que le galvanomètre, relié comme l'indique la figure, reste au zéro quand la manette des bobines est sur la touche 14 et le curseur sur la division 340. Si, au lieu d'employer l'élément Clark dont la force électromotrice est toujours comprise entre 1,4 et 1,5 volt, on utilisait l'élément Weston, on ne prendrait que 10 bobines additionnelles.

Pour mesurer à l'aide de l'appareil des différences de potentiel supérieures à 1,5 volt, on applique la tension cherchée à une grande résistance dont on oppose une partie connue, la $^1/_{100}{}^e$ par exemple, au fil calibré.

S'agit-il d'étalonner des courants plus ou moins intenses, on fait passer ceux-ci dans des résistances étalons, choisies de manière à créer une tension inférieure à 1,5 volt et l'on oppose cette tension à celle du fil divisé.

Enfin, l'appareil peut servir à la comparaison des résistances. Dans ce but, on fait passer un même courant dans une résistance connue r et dans la résistance cherchée x. A l'aide du potentiomètre on compare les tensions e et e' existant aux bornes de r et x.



Fig. 113.

Les rapports $\frac{e}{e'}$ et $\frac{r}{x}$ sont égaux.

On voit que la méthode est d'un emploi très étendu et que le

potentiomètre est un des appareils les plus utiles dans un laboratoire.

La fig. 113 représente la forme portative donnée à l'instrument par MM. Arnoux et Chauvin.

La boîte principale comporte à l'avant un fil calibré, muni d'un fil de compensation destiné à corriger les variations de l'élément Latimer Clark. A l'arrière sont 15 sections de résistances égales à celle du fil divisé. Vers le milieu, on voit deux éléments Clark avec thermomètres. A gauche se trouvent un galvanoscope sensible avec loupe et une résistance de 100 000 ohms. La petite boîte de droite comprend 2 éléments secondaires capables de fournir un courant constant de 0,05 ampère environ.

M. Feussner (¹) a également combiné un appareil qui permet de mesurer toutes les tensions comprises entre 0,014 volt et 1 400 volts, et, si l'on dispose de résistances étalons de forte section, toutes les intensités de courant à partir de 0,0001 jusqu'à 1 000 ampères, avec une approximation de 0,1 pour 100.

La fig. 114 indique le schéma de cette disposition qui comporte un élément étalon Clark p, modèle du Reichsanstalt, servant de base de comparaison pour les tensions, une résistance A de 100 000 ohms, une boîte de résistance B à fiches, contenant 99 990 ohms, un rhéostat à manette C comprenant 9 résistances de 1 000 ohms, une caisse de résistance à fiches D′ graduée de 0,1 à 50 ohms et un rhéostat à manette E formé de 9 bobines de 100 ohms. Une dernière boîte D, contenant les principales résistances de D′, est encore adjointe au système, en vue de permettre de maintenir le courant, fourni par une pile auxiliaire P. sensiblement constant dans le circuit principal : à cet effet, on bouche dans D les résistances débouchées en D′ pour le réglage. Dans un modèle récent, un enclanchement permet d'effectuer par une seule manœuvre cette double opération.

Pour comparer un élément de pile à l'élément Clark, on agit sur les manettes k_1 et k_2 et sur les résistances D′, de manière à obtenir

(¹) Feussner, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*; 1890.

l'équilibre du galvanomètre G lorsque le commutateur k_4 est relié successivement à l'élément Clark et à la pile étudiée, qu'on raccorde aux bornes a, a'. Afin d'éviter la polarisation de l'étalon Clark, on commence les tâtonnements en introduisant les 100 000 ohms à la suite du galvanomètre, à l'aide de la clef k_3. On ne supprime cette résistance additionnelle que pour le réglage définitif.

Si l'on doit déterminer une différence de potentiel, inférieure à

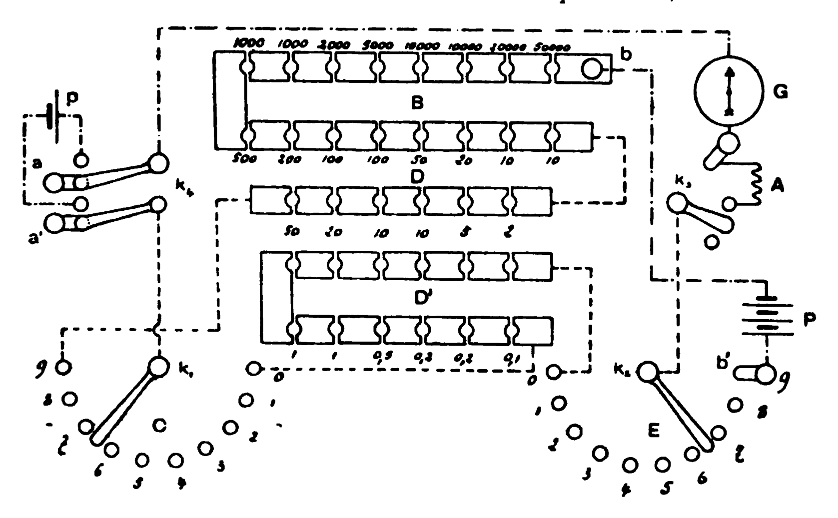


Fig. 114.

14 volts, existant entre deux points d'un circuit parcouru par un courant continu, on relie également ces points aux bornes a et a' et l'on procède comme ci-dessus. Si la résistance totale du circuit de la pile auxiliaire P est 100 000 ohms et si une résistance r comprise entre les manettes k_1 et k_2 assure le repos du galvanomètre, lorsque la clef k_4 est reliée au couple étalon, on a, en désignant par e la force électromotrice de la pile auxiliaire,

$$\frac{e}{100\,000} = \frac{1{,}434 - 0{,}001\,(t^o - 15^o)}{r} = \frac{1{,}449 - 0{,}001\,t^o}{r}.$$

Soit, d'autre part, V la différence de potentiel cherchée, pour laquelle l'équilibre est obtenu au moyen d'une résistance r' :

$$\frac{e}{100\,000} = \frac{V}{r'};$$

Par suite

$$V = (1{,}449 - 0{,}001\, t^o)\, \frac{r'}{r}.$$

Pour mesurer les différences de potentiel comprises entre 14 et 1 400 volts, on applique ces tensions aux bornes *b* et *b'* auxquelles, dans le cas précédent, était reliée la pile auxiliaire.

Dans ces conditions,

$$V = \frac{(1449 - t^o)\, 100}{r}.$$

Enfin, pour évaluer des intensités de courant à l'aide de l'appareil de M. Feussner, on fait passer ces courants dans des résistances étalonnées de valeurs convenables, aux bornes desquelles on mesure la différence de potentiel; le rapport de la tension observée à la résistance de l'étalon fait connaître l'intensité cherchée. Les résistances destinées à la mesure des courants intenses sont composées de bandes de manganine immergées dans un hydrocarbure liquide refroidi par l'agitation.

Variantes de la méthode d'opposition. Emploi des balances électrodynamiques. Méthode de Lacoine. — Si l'on n'a pas d'élément étalon à sa disposition ou si l'on doit vérifier un tel étalon, on peut mesurer, à l'aide d'une balance électrodynamique, le courant produit par une pile auxiliaire dans une résistance variable r et opposer à la différence de potentiel des bornes de cette résistance la force électromotrice à étalonner, par l'intermédiaire d'une boîte de 100 000 ohms, d'un galvanomètre et d'une clef. Lorsque le réglage de r a amené l'équilibre, il suffit d'appliquer la relation $e = ir$.

L'erreur limite commise sur e est la somme des erreurs qu'entraînent les mesures de i et de r. Comme dans la méthode de Poggendorff, il faut adopter un galvanomètre très sensible pour que l'erreur de lecture ait peu d'influence.

Une autre variante de la méthode de Poggendorff a été suggérée par Lacoine. Elle consiste à reporter la pile e', à laquelle on compare e, à la suite de la résistance r', au lieu de la placer dans la branche du galvanomètre (fig. 115). Cette disposition met les deux piles dans les mêmes conditions de débit en les reliant en tension et non en

opposition comme dans la méthode de Poggendorff. Elle ne peut convenir si l'une des piles est très polarisable.

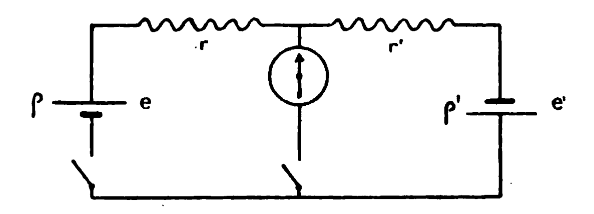


Fig. 115.

En appliquant les lois de Kirchhoff, il est facile de voir que le courant s'annule dans le galvanomètre lorsque la condition suivante est satisfaite :

$$\frac{e}{e'} = \frac{r + \rho}{r' + \rho'}.$$

Cette méthode donne lieu à une discussion semblable à celle de la méthode de Poggendorff.

Chapitre XIII.

MESURE DES RÉSISTANCES.

Méthodes indirectes. Méthode de Weber. — Pour la détermination de l'étalon de l'ohm, on a dû évaluer la résistance d'un circuit sans se servir d'une résistance de comparaison. Différentes méthodes ont été employées dans ce but; l'une des plus simples est celle du cadre tournant de Weber. Une bobine circulaire de grand diamètre est disposée de telle manière que le plan de ses spires soit normal à celui du méridien magnétique, et peut tourner autour d'un diamètre vertical. Elle est reliée par l'intermédiaire de deux frotteurs à un galvanomètre des tangentes situé à une distance suffisante pour que l'aiguille ne soit pas influencée directement par la bobine.

Si l'on fait exécuter au cadre mobile une demi-révolution, il s'y développe, par induction électromagnétique, une quantité d'électricité représentée par

$$q = \frac{2\,\mathcal{H}\,n\,s}{R},$$

$\mathcal{H}$ désignant la composante horizontale du champ terrestre, n le nombre de spires du cadre, s la surface moyenne d'une spire et R

la résistance totale du circuit. Cette quantité d'électricité, traversant le galvanomètre, amène une élongation α telle que

$$\frac{2\,\mathcal{H}\,s\,n}{R} = \frac{\mathcal{H}'\,T_0}{G\,\pi}\,\alpha\,e^{\frac{\lambda}{\pi}\,\text{arc tang}\,\frac{\pi}{\lambda}}.$$

Si le champ magnétique terrestre a la même intensité aux endroits où se trouvent le galvanomètre et le cadre tournant, ce qu'on peut vérifier en comparant les durées d'oscillation d'une même aiguille aimantée en ces deux points, il vient

$$R = 2\,n\,s\,G\,\frac{\pi}{T_0}\cdot\frac{1}{\alpha\,e^{\frac{\lambda}{\pi}\,\text{arc tang}\,\frac{\pi}{\lambda}}}.$$

On déduit de cette formule l'exactitude avec laquelle on doit déterminer G, T_0 et α, suivant l'approximation avec laquelle on veut obtenir la valeur de R. En négligeant le facteur d'amortissement et en admettant que les erreurs s'ajoutent, on a, pour l'erreur limite,

$$\frac{dR}{R} = \frac{ds}{s} + \frac{dG}{G} + \frac{dT_0}{T_0} + \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Méthode de la perte de charge. — Voici une autre méthode de mesure indirecte, qui peut être appliquée quand il s'agit d'évaluer

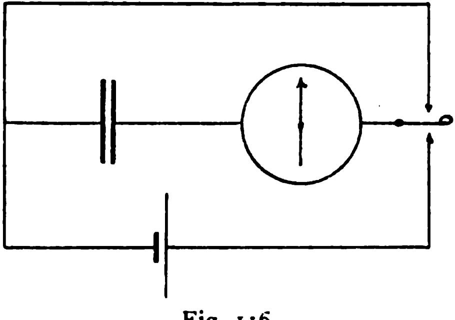


Fig. 116.

des résistances très élevées pour lesquelles il est difficile de se procurer des étalons du même ordre. Soit à mesurer la résistance d'isolement entre les armatures d'un condensateur.

On charge le condensateur et l'on détermine la différence de potentiel des armatures, soit au moyen d'un électromètre, soit en la déduisant de l'élongation accusée par un galvanomètre intercalé dans le circuit de charge comme le montre la fig. 116. On laisse ensuite le condensateur se décharger à travers son propre diélectrique, en isolant le levier de la clef de décharge, et, au bout d'un temps t, on observe de nouveau la différence de potentiel, soit avec un électromètre, soit en déchargeant les armatures dans un galvanomètre. On sait qu'on a, entre la résistance R du diélectrique, la capacité c du condensateur et les différences de potentiel V_0 et V_t, la relation

$$t = cR\log_e \frac{V_0}{V_t}. \qquad (1)$$

Si c est exprimé en microfarads, R est donné en mégohms.

De cette relation on tire

$$R = \frac{t}{c\log_e \frac{V_0}{V_t}} = \frac{t}{2{,}3\,c\,\mathrm{Log}\frac{V_0}{V_t}}.$$

Le rapport des différences de potentiel est d'ailleurs ramené au rapport de deux lectures électrométriques ou galvanométriques :

$$R = \frac{t}{2{,}3\,c\,\mathrm{Log}\frac{\alpha_0}{\alpha_t}} = \frac{t}{2{,}3\,c\,\mathrm{Log}\,n}.$$

L'erreur relative résultant de l'inexactitude des lectures a pour expression

$$\frac{dR}{R} = \frac{\dfrac{\alpha_0\,d\alpha_t - \alpha_t\,d\alpha_0}{\alpha_t^2}}{\dfrac{\alpha_0}{\alpha_t}\log_e\dfrac{\alpha_0}{\alpha_t}}$$

ou, en supposant $d\alpha_t = -d\alpha_0 = d\alpha$,

$$\frac{dR}{R} = \frac{n+1}{\log_e n}\frac{d\alpha}{\alpha_0}.$$

---

(1) Eric Gerard, *Leçons sur l'Electricité;* t. I, chap. IX.

L'erreur $\frac{dR}{R}$ est d'autant plus faible que α_0 est plus grand et le rapport $\frac{n+1}{\log_e n}$ plus petit. La valeur minima de ce rapport correspond à

$$\log_e n = \frac{n+1}{n}$$

d'où

$$n = e^{\frac{n+1}{n}} = e \times e^{\frac{1}{n}} = e\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{1}{2n^2} + \ldots\right).$$

En ne considérant que les deux premiers termes de la série, on trouve

$$n = 3,5 \text{ (M. de Weydlich)}.$$

Lorsque la résistance à mesurer est très élevée, le temps correspondant à la condition précédente est beaucoup trop long.

Dans cette méthode, comme dans toutes celles qui se rapportent à la mesure des résistances élevées, il faut assurer avec un soin extrême l'isolement de tous les appareils insérés dans les circuits. Les pièces en ébonite destinées à éviter les déperditions d'électricité doivent être soigneusement nettoyées et séchées ; les fils de connexion en contact avec les tables d'expérience doivent être recouverts d'une forte couche de caoutchouc ou de gutta-percha. Enfin, la pile doit être supportée sur des isolateurs. Sans ces précautions, il peut arriver que la résistance d'isolement du circuit soit moindre que celle à mesurer.

La méthode de la perte de charge implique l'hypothèse que la résistance d'un diélectrique est indépendante de la tension à laquelle celui-ci est soumis, ce qui n'est pas tout à fait exact ; aussi ne faut-il pas viser à une exactitude supérieure au 0,02 dans ce genre de mesures.

Cette même méthode peut être employée pour mesurer des grandes résistances quelconques. Si l'on dispose d'un condensateur dont l'isolement est suffisamment élevé, on procède comme ci-dessus en dérivant la résistance à étudier x sur les armatures. On trouve ainsi la résistance combinée $\frac{Rx}{R+x}$ du condensateur et de x. Si la résistance inconnue x est assez petite par rapport à R, la mesure donne sensiblement sa valeur.

Méthode par le voltmètre et l'ampèremètre. — La mesure des résistances très faibles exige des dispositions spéciales qui seront décrites ci-après. Dans les usines où l'on doit mesurer la résistance d'induits de dynamos, qui n'atteint souvent qu'une faible fraction d'ohm, on se sert fréquemment de la méthode indirecte suivante. On envoie dans la résistance inconnue un courant mesuré à l'aide d'un ampèremètre, et l'on relève la chute de potentiel que la résistance occasionne au moyen d'un voltmètre gradué pour les faibles tensions. Le rapport de l'indication de ce dernier appareil à l'intensité du courant, représente la résistance cherchée. L'erreur limite qu'on peut commettre sur la valeur de celle-ci est la somme des erreurs qu'entraîne l'emploi des deux instruments. Il faudra donc utiliser un courant capable d'amener les index de ces appareils vers l'extrémité des échelles et avoir soin de ne laisser passer le courant que pendant un temps assez court pour ne pas modifier d'une manière appréciable la température du conducteur soumis à l'essai.

Méthodes directes. Méthode de déviation. — Cette méthode repose sur la comparaison des courants que débitent des piles, dont les forces électromotrices sont dans un rapport déterminé, quand on les relie à la résistance inconnue et à une résistance étalon. Elle s'applique le plus souvent à la mesure des résistances de l'ordre du mégohm, très supérieures par conséquent à la résistance des étalons dont on dispose généralement.

On forme le circuit ci-après au moyen d'un galvanomètre sensible à grande résistance pourvu d'un shunt, de la résistance étalon qu'on choisit aussi élevée que possible et d'un élément de pile.

On constate un courant

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{r + \rho + \frac{g}{m}} \times \frac{1}{m}.$$

r désigne la résistance de l'étalon, ρ celle de la pile dont la force électromotrice est e, g celle du galvanomètre et m le pouvoir multiplicateur du shunt.

On substitue à l'étalon la résistance inconnue x. Dans le cas

où celle-ci est constituée par la gaîne isolante d'un câble, on protège le galvanomètre par une clef qui met l'appareil en court-circuit au moment où l'on abaisse l'inverseur de la pile, afin d'éviter que le courant de charge du câble ne projette trop vivement l'équipage mobile. Pour obtenir une déviation perma-

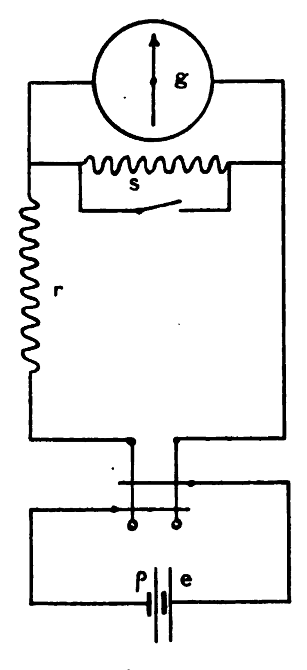


Fig. 117.

nente convenable, on est amené à employer n éléments de pile, dont les forces électromotrices ont été comparées, par une mesure préalable, à celle de l'élément utilisé d'abord, et à réduire le pouvoir multiplicateur du shunt à m'.

On a alors, dans le cas où tous les éléments de pile sont identiques à e,

$$i = \frac{\alpha'}{k} = \frac{ne}{x + n\rho + \frac{g}{m'}} \times \frac{1}{m'}$$

d'où

$$x = \frac{m}{m'} \frac{n\alpha}{\alpha'} \left(r + \rho + \frac{g}{m}\right) - \left(n\rho + \frac{g}{m'}\right).$$

$\rho + \frac{g}{m}$ est généralement négligeable devant r; souvent même le second terme, $n\rho + \frac{g}{m'}$, peut être négligé devant le premier. L'équation se réduit alors à

$$x = \frac{\alpha}{\alpha'} \frac{mn}{m'} r.$$

Comme les erreurs de lecture s'ajoutent dans l'estimation de l'erreur limite commise sur x, il faut chercher à obtenir des déviations aussi grandes que possible.

Comme on l'a déjà fait remarquer, dans la mesure des grandes résistances, il faut veiller d'une manière toute spéciale à l'isolement des diverses parties des circuits, afin d'éviter les erreurs grossières que peuvent causer les courants de perte. Ainsi, comme il est assez difficile d'isoler parfaitement les piles, il faut avoir soin, lorsqu'on mesure le courant qui traverse le diélectrique d'un câble, de placer le galvanomètre, non entre la pile et la terre, mais entre la pile et le câble, afin que le courant de perte de la pile ne traverse pas le galvanomètre.

On pourrait supprimer le shunt dans la seconde expérience; mais les cahiers des charges relatifs aux câbles prescrivent une tension d'essai considérable, qui oblige le plus souvent à shunter le galvanomètre.

Lorsqu'on a une série de mesures à effectuer, on détermine la constante du galvanomètre, correspondant à un micro-ampère, au commencement des expériences et l'on exprime les résistances en mégohms d'après la formule

$$x = \frac{k}{\alpha} ne \frac{1}{m'} - \left(n\rho + \frac{g}{m}\right).$$

On verra dans un chapitre spécial les précautions à employer dans les diverses mesures de résistance à l'isolement.

Ohmmètres.— Imaginons un galvanomètre dont l'aiguille mobile est soustraite, autant que possible, à l'action terrestre, grâce à la présence d'une seconde aiguille réalisant un système astatique ou d'un aimant directeur antagoniste, par exemple. Sur l'aiguille

agissent deux cadres galvanométriques disposés à angle droit. L'équipage mobile prend dans ces conditions une position d'équilibre dépendant du rapport des courants qui passent dans les deux bobines. Dans le cas où les courants sont égaux et les enroulements identiques le champ résultant est dirigé suivant la bissectrice de l'angle des bobines. Avec des courants différents, le système astatique fait avec le plan d'un des cadres un angle α tel que, si l'on appelle i le courant qui traverse ce cadre et i' celui qui passe dans le cadre normal au premier,

$$\frac{i'}{\cos\alpha} = \frac{i}{\sin\alpha};$$

d'où

$$\frac{i}{i'} = \operatorname{tang}\alpha.$$

L'appareil est donc susceptible de faire connaître le rapport des deux intensités, d'où le nom de *comparateur de courants* qu'on lui donne parfois.

En soumettant les deux bobines à une même différence de potentiel, la position d'équilibre est déterminée par les résistances des deux circuits dérivés. Pour appliquer cette remarque à la mesure des résistances, on gradue l'échelle du galvanomètre en insérant des résistances variables en série avec l'un des multiplicateurs; on inscrit ces résistances sur la graduation, de façon à ce que l'appareil renseigne directement les ohms.

MM. Ayrton et Perry, ainsi que M. Evershed, ont réalisé des appareils de ce genre servant à estimer approximativement la résistance d'isolement des circuits. Par l'insertion d'un shunt de pouvoir multiplicateur connu, 100 par exemple, entre les bornes de la bobine appartenant au circuit de résistance invariable, on peut lire sur la même graduation des résistances 100 fois plus grandes.

Pour rendre l'influence du champ terrestre tout à fait négligeable devant l'action des bobines, on fait usage d'une force électromotrice assez grande. M. Evershed emploie une petite machine magnéto-électrique à courants redressés développant environ 100 volts. Il est d'ailleurs avantageux de soumettre les circuits essayés à une différence de potentiel assez élevée.

M. Carpentier a utilisé le galvanomètre à aimant fixe à la cons-

truction d'un ohmmètre qui est moins influencé que les appareils à aiguille aimantée par les machines dynamo-électriques, fig. 118. L'équipage mobile, pivotant entre deux pointes dans des chapes en agate, comporte deux bobines orientées à angle droit et entourant des noyaux superposés en fer doux. Les pièces polaires de l'aimant fixe sont planes, afin que le couple électromagnétique auquel chacun des cadres mobiles est soumis varie, pour un même courant, avec l'écart angulaire. Le courant est amené aux cadres

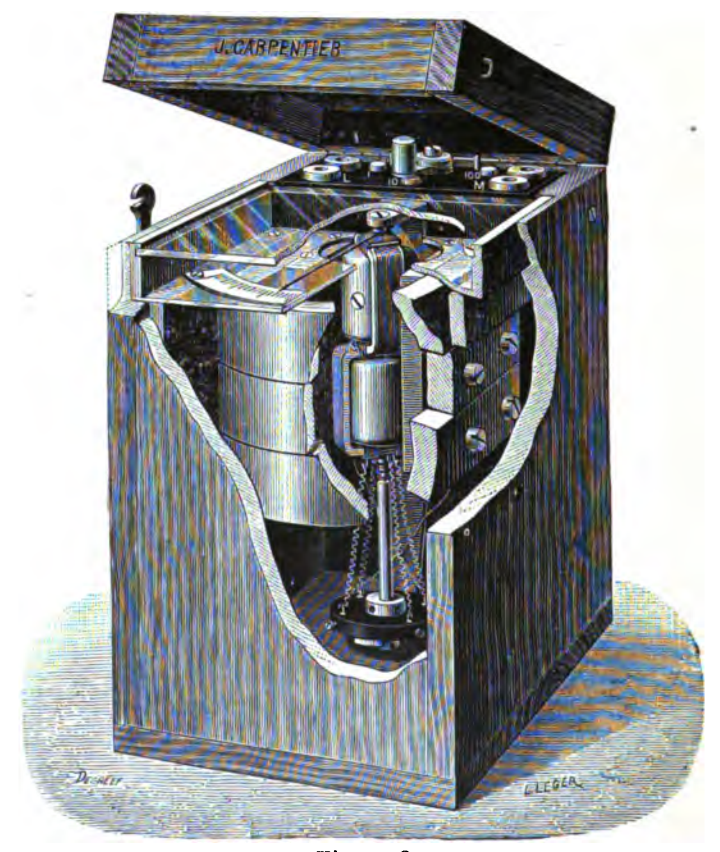


Fig. 118.

par des boudins flexibles. Pour rendre l'effort de torsion de ceux-ci négligeable, M. Carpentier utilise également une petite machine magnéto-électrique donnant 120 volts à 100 tours. L'induit de

cette machine est partagé en huit sections et le collecteur comprend huit lames, afin que les variations du courant ne soient pas trop considérables. Sans cette précaution, les effets de charge qui troublent les mesures d'isolement des câbles pourraient fausser sérieusement les résultats. L'approximation que procure cet appareil est d'environ 5 pour 100.

Les dispositions précédentes ne permettent de déterminer avec quelque précision que les résistances égales ou supérieures à celle des cadres de l'ohmmètre.

On pourrait toutefois utiliser un appareil analogue pour mesurer les faibles résistances. On ferait dans ce cas passer un courant de quelques ampères, dû à un accumulateur, dans la résistance inconnue X et dans une résistance étalon R. Les deux circuits de l'ohmmètre seraient dérivés, l'un sur X, l'autre sur R. Dans l'hypothèse de l'égalité des résistances des deux cadres galvanométriques, les courants dérivés dans ceux-ci seraient dans le rapport des résistances comparées. Une graduation préalable serait faite comme dans le cas des grandes résistances.

Méthodes de zéro. Méthode du galvanomètre différentiel. — Plusieurs cas sont à considérer :

1° La résistance à mesurer est plus grande que celle des enroulements du galvanomètre différentiel, fig. 119.

On met alors la résistance inconnue et la boîte de résistance étalon en série chacune avec l'une des bobines du galvanomètre. Lorsque l'équipage mobile demeure au zéro, on a

$$x = r.$$

Avec un galvanomètre sensible, il faut, pour commencer le réglage, réduire la force électromotrice, car il serait trop difficile de shunter également les deux circuits galvanométriques. Pour cela, on relie la pile à une résistance sur une partie de laquelle on dérive le galvanomètre. Lorsque le réglage est à peu près terminé, on peut utiliser la force électromotrice totale.

Généralement, la résistance de comparaison n'est pas un rhéostat réglable par degrés insensibles, mais une boîte de résistance ordinaire, de sorte qu'on ne parvient pas à trouver une valeur de r pour

laquelle la déviation s'annule. Soit α la déviation à droite obtenue avec une résistance r et α' la déviation à gauche que produit une

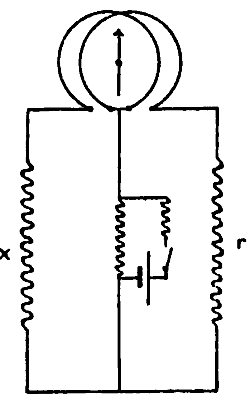


Fig. 119.

résistance $r + 1$. Par interpolation, on déduit

$$x = r + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}.$$

De là on tire

$$dx = \frac{\alpha' d\alpha - \alpha d\alpha'}{(\alpha + \alpha')^2} = \frac{d\alpha}{\alpha + \alpha'},$$

en cumulant les erreurs de lecture ; par suite

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{x(\alpha + \alpha')}. \qquad (1)$$

Remarquons que, dans l'un des circuits galvanométriques, on a, en négligeant la résistance de la pile,

$$i = \frac{e}{g + r},$$

et, dans l'autre,

$$i' = \frac{e}{g + x}.$$

La différence $\frac{e}{g+r} - \frac{e}{g+x}$ correspond à la déviation α, et l'on a

$$\frac{\alpha}{k} = e\left(\frac{1}{g+r} - \frac{1}{g+x}\right).$$

De même

$$\frac{\alpha'}{k} = e\left(\frac{1}{g+x} - \frac{1}{g+r+1}\right);$$

d'où, en ajoutant membre à membre,

$$\frac{\alpha+\alpha'}{k} = \frac{e}{(g+r)(g+r+1)}, \quad \text{soit} \quad \frac{e}{(g+x)^2}.$$

En remplaçant dans (1), il vient

$$\frac{dx}{x} = \frac{(g+x)^2\, d\alpha}{k\,e\,x}.$$

L'erreur relative est minima lorsque la fonction $\frac{k\,x}{(g+x)^2}$ est maxima.

Dans le cas d'un galvanomètre à aimant fixe, on a (chap. VI)

$$k = \frac{\mathcal{H}\, s\, n}{c},$$

et, à volume constant de la bobine galvanométrique,

$$g = \mathrm{A}\, n^2;$$

donc

$$k = \frac{\mathcal{H}s\sqrt{\frac{g}{\mathrm{A}}}}{c} = \mathrm{B}\sqrt{g},$$

par suite,

$$\frac{kx}{(g+x)^2} = \frac{\mathrm{B}\,x\sqrt{g}}{(g+x)^2}.$$

Le maximum de cette expression correspond à

$$g = \frac{x}{3}\ \left(\text{M. De Bast}\right).$$

En pratique, si l'on a le choix entre plusieurs galvanomètres, on choisira celui dont la résistance de chacun des multiplicateurs se rapproche le plus de cette condition.

2° Lorsque les résistances à comparer sont beaucoup plus faibles que celles du galvanomètre, il est préférable d'adopter le couplage indiqué dans la fig. 120, les deux résistances étant mises en déri-

vation sur les deux circuits de l'instrument. Ce sont alors les différences de potentiel aux extrémités des résistances comparées qui produisent les courants traversant le galvanomètre. Les

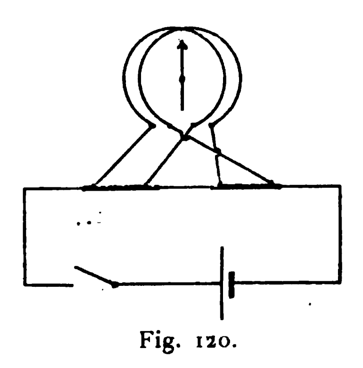


Fig. 120.

résistances de contact, qui jouent un rôle important dans la mesure des résistances faibles, sont ainsi en série, non pas avec celles-ci, ce qui constituerait une cause d'erreur considérable,

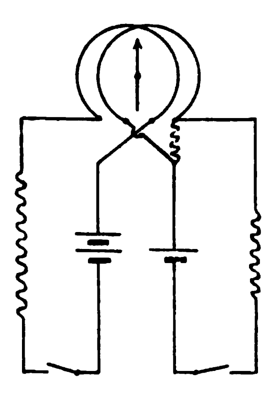


Fig. 121.

mais avec les bobines du galvanomètre qui doivent avoir une résistance suffisante pour que l'erreur due aux contacts soit négligeable. Il est nécessaire que les points de raccordement au galvanomètre soient compris entre les points d'attache des résistances étudiées au circuit principal.

3° Lorsqu'on doit comparer des résistances très différentes, on peut shunter le circuit du galvanomètre relié à la résistance la plus

faible et admettre dans l'autre circuit un nombre d'éléments de pile n fois plus grand que celui utilisé dans la branche voisine, fig. 121.

En appelant m le pouvoir multiplicateur du shunt, on a, sous les réserves formulées à l'occasion de la méthode de déviation,

$$x = mnr.$$

4° Si le galvanomètre n'est pas exactement différentiel, on adopte une méthode semblable à la double pesée : on substitue à x une résistance connue qui ramène l'équilibre de l'aiguille et qui est par conséquent égale à x.

Un autre artifice consiste à intervertir x et r et à faire varier r jusqu'à ce que le galvanomètre donne la même lecture avec les deux dispositions ; alors $x = r$.

Enfin, on peut se servir d'un galvanomètre dont les deux branches ont des constantes inégales en déterminant, au préalable, le rapport de ces constantes galvanométriques.

Pont de Wheatstone. Principe de la méthode. Positions du galvanomètre et de la pile. Valeurs les plus favorables à donner aux résistances du pont. — La méthode du pont de Wheatstone est la plus employée, parce qu'elle permet de mesurer avec une grande approximation des résistances comprises entre des limites écartées.

Sur deux conducteurs ABC, ADC, fig. 122, on dérive une branche ou *pont* BD et l'on réunit les points A et C par une branche AC.

On constitue ainsi un réseau de conducteurs qui a reçu le nom de pont de Wheatstone, dans lequel chaque côté est adjacent à 4 autres. Les côtés non adjacents sont dits *conjugués*.

Désignons par $r_1, r_2, \ldots . r_6$ les résistances des 6 branches ; par $e_1, e_2, \ldots . e_6$, les forces électromotrices interposées dans celles-ci, et par $i_1, i_2, \ldots . i_6$, les courants correspondants. D'après les lois de Kirchhoff, on a

$$i_5 = i_1 + i_2,$$
$$i_5 = i_3 + i_4,$$
$$i_1 r_1 + i_3 r_3 + i_5 r_5 = e_1 + e_3 + e_5,$$
$$i_2 r_2 + i_4 r_4 + i_5 r_5 = e_2 + e_4 + e_5,$$

en admettant que les signes des forces électromotrices soient contenus implicitement dans les expressions e.

Une variation élémentaire de la résistance ou de la force électromotrice de la branche 6 produit des variations d'intensité dans les

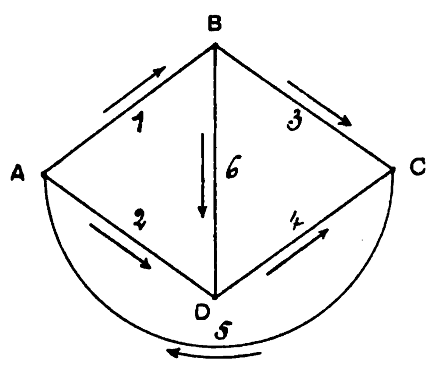


Fig. 122.

courants qui traversent les autres branches. Ces variations sont liées par les relations

$$di_5 = di_1 + di_2,$$
$$di_5 = di_3 + di_4,$$
$$r_1\, di_1 + r_3\, di_3 + r_5\, di_5 = 0,$$
$$r_2\, di_2 + r_4\, di_4 + r_5\, di_5 = 0.$$

Pour que les modifications apportées à la branche 6 n'amènent aucun changement dans 5, c'est à dire pour que di_5 soit nul, il faut que

$$di_2 = -\, di_1,$$
$$di_4 = -\, di_3,$$
$$r_1\, di_1 = -\, r_3\, di_3$$
$$r_2\, di_2 = -\, r_4\, di_4;$$

d'où

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$$

ou

$$r_1\, r_4 = r_2\, r_3.$$

Il suit de là que, pour qu'une variation de résistance ou de force électromotrice d'une branche quelconque du réseau n'affecte pas le courant de la branche conjuguée, il faut que les produits des

résistances des deux autres couples de branches conjuguées soient égaux.

Cette propriété curieuse a été appliquée par Wheatstone de la manière suivante, fig 123. Les branches *a*, *b*, *c* sont constituées par des caisses de résistance ; la branche *x* est occupée par le conducteur dont la résistance est inconnue. Un galvanomètre occupe le cinquième côté du pont, tandis qu'une pile de force électromotrice *e* et de résistance ρ est insérée dans le sixième côté.

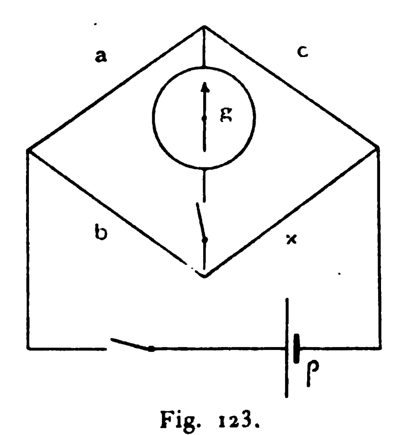


Fig. 123.

La forme schématique de la figure par laquelle on représente ordinairement cette disposition lui a fait donner le nom de parallélogramme de Wheatstone, dont les 4 *côtés* sont reliés par la *diagonale* de la pile et par celle du galvanomètre.

Le courant dans la branche du galvanomètre est donné par l'expression suivante, déduite des lois de Kirchhoff,

$$i = e \frac{bc - ax}{(a+b+c+x)\left\{\frac{(a+c)(b+x)}{a+b+c+x} + g\right\}\left\{\frac{(a+b)(c+x)}{a+b+c+x} + \rho\right\}} \quad (1)$$

$$= \frac{bc - ax}{\mathrm{M}}.$$

On remarquera que le premier terme fractionnaire $\frac{(a+c)(b+x)}{a+b+c+x}$ du dénominateur M représente la résistance combinée des quatre branches *a*, *b*, *c*, *x* reliées à la pile ρ. Le second terme fractionnaire est la résistance combinée des mêmes branches considérées par

rapport à g. Quand la relation $bc = ax$ est satisfaite, le courant s'annule dans le galvanomètre ; on a alors

$$x = \frac{b}{a} c.$$

Cette expression montre que les résistances des branches conjuguées b et c, a et x, ne peuvent être ni les deux plus grandes ni les deux plus petites; les résistances les plus faibles sont donc adjacentes.

Or, il est possible de permuter le galvanomètre et la pile, et l'on doit se demander quelle est, pour des résistances a, b, c, x données, la combinaison la plus avantageuse. Les résistances les plus faibles servent de shunt soit au galvanomètre, ce qui est le cas si a et b sont les résistances susdites, soit à la pile. Il est naturel de shunter ainsi celui de ces deux appareils dont la résistance est la plus petite, pour que l'atténuation de sensibilité produite par le shunt soit minima.

On peut se convaincre qu'il doit en être ainsi, en déterminant l'intensité i' du courant dans le galvanomètre, supposé permuté avec la pile, et en prenant la différence entre i et i'. On verrait que cette différence est positive lorsque, dans la première disposition, la diagonale dont la résistance est la plus forte réunit le point de jonction des côtés adjacents les plus résistants au point de jonction des côtés les moins résistants.

En pratique, la résistance du galvanomètre est presque toujours supérieure à celle de la pile. Il convient donc de ne jamais shunter le galvanomètre par les résistances les plus faibles.

Valeurs les plus favorables à donner aux résistances du pont. La relation $bc - ax = o$ peut être satisfaite par une infinité de valeurs de b, c et a. On doit se demander quelles sont les valeurs particulières de ces résistances qui, pour une légère altération de l'une d'elles, c, produisent la plus grande variation du courant dans le galvanomètre. Une variation dc détermine une variation di exprimée par l'équation suivante déduite de (1) et de laquelle on a éliminé c en supposant $c = \frac{ax}{b}$

$$di = e \frac{b^2\,dc}{[g(a+b) + a(b+x)]\,[\rho(b+x) + x(a+b)]} = \frac{eb^2dc}{M}. \qquad (2)$$

Si l'on recherche les valeurs de a et de b qui rendent maxima la valeur de di, on trouve [1]

$$a = \sqrt{\rho g}$$

$$b = \sqrt{gx \frac{\rho + x}{g + x}}.$$

En introduisant ces valeurs dans l'équation (2) et en considérant le plus petit courant $di = \frac{d\alpha}{k}$ appréciable au galvanomètre, on trouve la valeur de l'écart limite dc qui ne produit plus aucun effet sur l'appareil et, partant, l'erreur qu'on peut commettre sur la résistance cherchée dans le cas où l'on emploie des résistances à curseur et où l'équilibre du galvanomètre peut être obtenu.

On obtient l'expression

$$dx = \frac{d\alpha}{k} \frac{\mathrm{M}}{e a b},$$

dans laquelle il suffit de remplacer a et b par les valeurs trouvées plus haut.

En outre, on sait que la puissance fournie par la pile est maxima lorsque la résistance de celle-ci est égale à la résistance extérieure :

$$\rho = \frac{(a + c)(b + x)}{a + b + c + x},$$

et que la sensibilité du galvanomètre est maxima dans des conditions analogues :

$$g = \frac{(a + b)(c + x)}{a + b + c + x}.$$

En tenant compte de ces remarques, on trouve que la condition du maximum de sensibilité se réduit à

$$a = b = c = x = g = \rho.$$

---

(1) Heaviside, *Phil. Mag.*; 1873. — Vaschy, *Traité d'Électricité et de Magnétisme*; t. II, p. 319.

Cette condition est presque toujours irréalisable, attendu que le galvanomètre et la pile sont donnés dans la plupart des cas.

L'erreur relative

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{k} \frac{M}{cabx}$$

devient alors

$$\frac{d\alpha \times 16\, x^4}{k\, e\, x^3}.$$

Pour une erreur possible $d\alpha$ d'une division avec un galvanomètre dont la constante est 40×10^6, on a, si $x = 10$ et $e = 1$,

$$\frac{dx}{x} = \frac{16 \times 10^4}{40 \times 10^9} = \frac{4}{1\,000\,000}.$$

L'erreur d'étalonnage des bobines du pont est généralement très supérieure à cette erreur due à la lecture de l'indication du galvanomètre.

Pont à bobines. — Sous sa forme usuelle, le pont de Wheatstone comprend 3 séries de résistances groupées dans une même boite.



Fig. 124.

Les branches a et b, appelées ***branches de proportion***, sont composées chacune de trois bobines ayant respectivement des résistances de 10, 100 et 1 000 ohms. La ***branche de comparaison*** c comprend les bobines nécessaires pour former toutes les résistances

entières comprises entre 1 et 10 000 ohms environ. Le quatrième côté est constitué par la résistance inconnue. L'appareil comporte, en outre, deux clefs qui permettent de fermer la branche de la pile et celle du galvanomètre au moment de la mesure. Il faut avoir soin d'abaisser la clef de la pile avant celle du galvanomètre et de relever celle-ci la première, pour éviter les effets d'extra-courant dans le galvanomètre. Les clefs ne sont abaissées que le temps nécessaire pour les lectures, afin que les résistances ne s'échauffent pas sous l'action du courant.

Lorsque l'équilibre est obtenu, on a.

$$x = \frac{b}{a} c.$$

Le rapport $\frac{b}{a}$ peut recevoir les valeurs 100, 10, 1, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$. Comme, d'autre part, c est réglable de 1 à 10 000 ohms, il est possible de mesurer les résistances comprises entre $\frac{1}{100}$ et 1 000 000 ohms. Dans quelques modèles du pont à bobines, on trouve des résistances égales à 1 ohm dans les branches de proportion; on peut alors adopter les rapports 1 000 et $\frac{1}{1\,000}$ entre les résistances de ces branches. Pour éviter d'échauffer les fils des bobines, on a soin de n'employer que 1 ou 2 éléments de pile pour la mesure. On fait usage de piles de résistance suffisante pour que les courants ne puissent atteindre une intensité dangereuse pour les bobines. Les éléments secs sont d'un emploi commode pour ces mesures.

Une mesure préalable ayant fait connaître la valeur approximative de la résistance inconnue, on choisit les valeurs de a et b les plus voisines possible de celles qui donnent le maximum de sensibilité et l'on relie au galvanomètre, dont la résistance dépasse ordinairement celle de la pile, le point de jonction des résistances les plus grandes et celui des résistances les plus faibles. Il va sans dire que si la résistance inconnue est très grande ou très petite, on n'a pas le choix des valeurs à adopter pour les branches de proportion.

On détermine les résistances c et $c + 1$ donnant des écarts α et

α' des deux côtés de la position de repos du galvanomètre ; on a, en interpolant,

$$x = \frac{b}{a}\left(c + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}\right).$$

Pour déterminer l'erreur due à l'inexactitude des lectures, il suffit de différentier cette expression en supposant que les erreurs de lecture $d\alpha$ et $d\alpha'$ sont égales et s'ajoutent. Il vient :

$$dx = \frac{b}{a}\frac{d\alpha}{\alpha + \alpha'},$$

d'où

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\alpha}{\left(c + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}\right)(\alpha + \alpha')}.$$

C'est là la valeur de l'erreur relative dans le cas où l'on ne peut obtenir le retour au zéro du galvanomètre. Il est facile de voir que α et α' varient en sens inverse de c. Avec un galvanomètre sensible, on sera conduit à choisir la résistance de comparaison la plus grande possible. Pour augmenter c, il faut prendre le rapport $\frac{b}{a}$ aussi faible que possible. En supposant $\alpha + \alpha' = 100$ et $c = 100$, on peut, lorsque l'erreur de lecture atteint une division, commettre sur x une erreur relative de 0,0001.

Il est clair qu'il est inutile d'augmenter c au delà de la valeur pour laquelle un ohm en plus et en moins n'influence plus le galvanomètre. Il n'y a donc pas lieu de recourir à l'interpolation lorsqu'on mesure de grandes résistances et qu'on ne dispose pas d'un galvanomètre très sensible.

A l'erreur causée par les lectures viennent s'ajouter les erreurs dues à l'imperfection de la graduation des bobines et à la résistance des contacts des fiches et des connexions reliant la résistance inconnue au pont, erreurs qui sont voisines du 0,001 dans les boîtes ordinaires.

Pont à fil divisé. Méthode de MM. de Nerville et Benoit. — Le pont à fil divisé est particulièrement employé pour la graduation de résistances par comparaison avec des résistances

étalons de même grandeur. Soit A B un fil en maillechort ou en platine iridié, de longueur l, calibré et tendu entre les extrémités d'une série de blocs en cuivre, auxquelles il est soudé. Le long du fil glisse un curseur dont la position est repérée sur une échelle divisée parallèle au fil. Un vernier indique la position exacte du contact mobile, à un vingtième de millimètre près.

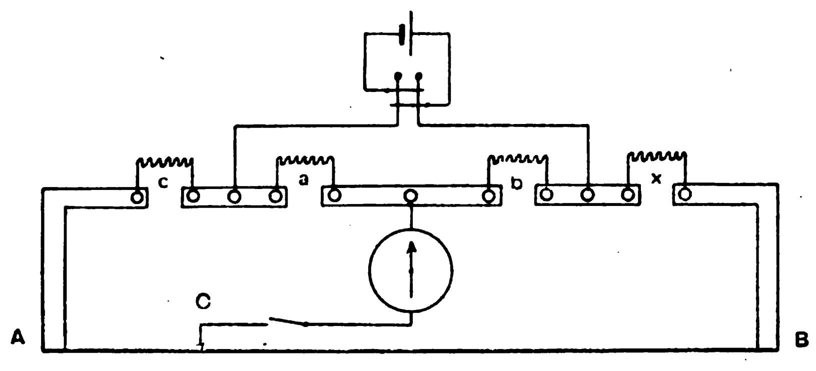


Fig. 125.

Après avoir réglé la bobine à étalonner x aussi exactement que possible, à l'aide du pont ordinaire à bobines, on l'insère entre deux des blocs de cuivre. Les branches a, b et c sont constituées par des résistances égales entre elles et aussi voisines que possible de la résistance à l'essai. Ce sont là les conditions de sensibilité les plus favorables, si la résistance du galvanomètre et celle de la pile sont du même ordre. Les résistances sont reliées aux blocs de cuivre de résistance négligeable par des godets à mercure que portent ces blocs.

Appelons r la résistance du fil correspondant à une division de l'échelle et soit l_1 la longueur A C qui détermine l'équilibre de l'aiguille du galvanomètre. On a la relation

$$\frac{a}{b} = \frac{c + r\,l_1}{x + r\,(l - l_1)}.$$

On substitue à x la résistance étalon R et l'on trouve une nouvelle longueur l_2 pour laquelle

$$\frac{a}{b} = \frac{c + r\,l_2}{R + r\,(l - l_2)}.$$

De là on tire

$$\frac{a}{b}=\frac{r\,(l_1-l_2)}{(x-\mathrm{R})-r\,(l_1-l_2)}.$$

On élimine le rapport $\frac{a}{b}$ en intervertissant les branches de proportion et en répétant les deux observations. On obtient

$$\frac{b}{a}=\frac{r\,(l'_1-l'_2)}{(x-\mathrm{R})-r\,(l'_1-l'_2)};$$

d'où

$$x-\mathrm{R}=r\,(l_1-l_2+l'_1-l'_2).$$

La différence entre les résistances comparées est ainsi obtenue

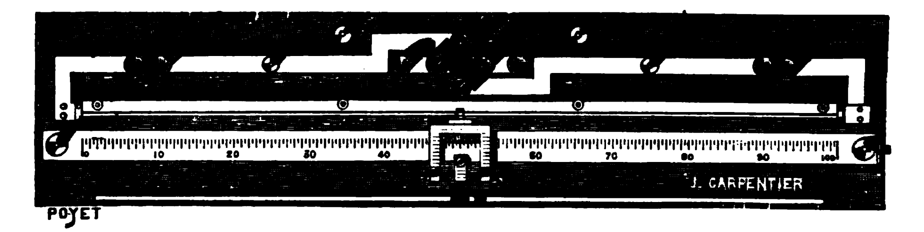


Fig. 126

en fonction de la résistance du fil. Si l'étalonnage au pont ordinaire a été fait au 0,001, la différence représente tout au plus $\frac{\mathrm{R}}{1\,000}$. Cette différence étant à son tour estimée au 0,01, la valeur peut être considérée comme exacte à 0,00001 près.

Calibrage d'un fil. — Le calibrage du fil du pont peut se faire de la manière suivante. On a soin de choisir un fil de section aussi uniforme que possible, qu'on vérifie à l'aide d'une bonne jauge. On y fait passer un courant assez faible pour ne pas l'échauffer sensiblement et l'on appuie sur le fil deux cavaliers portés par une entretoise isolante et présentant des lignes de contact bien nettes. On relie ces cavaliers à un galvanomètre très sensible et l'on observe si la déviation de celui-ci reste constante pour diverses positions occupées successivement par les cavaliers sur le fil. Si la déviation varie, on use le fil aux endroits où les tronçons ont une

résistance trop faible, à moins qu'on ne préfère employer une table de correction. Il ne reste qu'à déterminer la résistance totale du fil pour déduire la valeur r d'une des divisions.

Pont de Lord Kelvin. Emploi de ce pont pour l'étalonnage des résistances. — Les dispositions de pont précédentes ne permettent pas de mesurer exactement des résistances très faibles, parce que la résistance des contacts s'ajoute à celle du conducteur essayé; on court ainsi le risque d'introduire une erreur notable dans le résultat. Pour l'évaluation des résistances faibles, il faut employer des méthodes permettant d'éliminer l'influence des contacts; telle est la méthode de Lord Kelvin. S'il s'agit de mesurer la résistance d'un bout de barre métallique, on appuie celle-ci, désignée par la lettre M dans la fig. 127, sur des couteaux $h\,k$, $l\,i$, séparés l'un de l'autre par une distance connue. La résistance

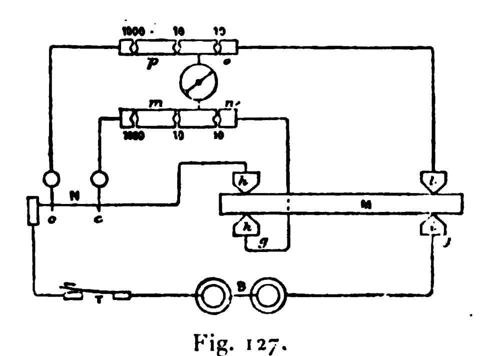


Fig. 127.

de comparaison est constituée par un gros fil de maillechort N disposé parallèlement à une règle graduée et sur lequel glissent des curseurs c, c. Le fil étalon et la barre à essayer sont intercalés dans le circuit d'une pile primaire ou secondaire B, pouvant débiter un courant de 5 à 15 ampères. En dérivation sur ce circuit, on dispose quatre résistances p, o, m, n et un galvanomètre sensible formant un pont entre celles-ci.

Les résistances p, o, m, n étant choisies de manière à satisfaire à la condition

$$\frac{m}{n} = \frac{p}{o}, \qquad (1)$$

on déplace les curseurs c, c jusqu'à ce que le galvanomètre n'accuse plus de courant.

Dans ces conditions, la résistance r du segment de fil compris entre les curseurs est à la résistance x de la portion de barre limitée par les couteaux dans le rapport $\frac{m}{n}$.

En effet, en appelant V_p, V_m, V_n, V_o, les potentiels respectifs des points c, c, k, l; V, le potentiel aux deux bornes du galvanomètre; I, l'intensité du courant dans les conducteurs N, M; i_1, i_2, les intensités dans les dérivations *cpol*, *cmnk*; on a les relations

$$I = \frac{1}{r}(V_p - V_m) = \frac{1}{x}(V_n - V_o),$$

$$i_1 = \frac{1}{p}(V_p - V) = \frac{1}{o}(V - V_o),$$

$$i_2 = \frac{1}{m}(V_m - V) = \frac{1}{n}(V - V_n).$$

En combinant ces équations avec (1), on en déduit

$$\frac{r}{x} = \frac{m}{n} = \frac{p}{o}.$$

Les résistances de contact sont négligeables devant les résistances m, n, p, o, auxquelles elles s'ajoutent.

Le principe du pont de Kelvin a été appliqué au Reichsanstalt à l'étalonnage des résistances.

Le dispositif, représenté par les fig. 128 et 129, est constitué par une boîte de résistance A à deux branches égales a, par la résistance à étalonner x et une résistance étalon r de même grandeur.

Le galvanomètre peut être raccordé en c_1, c_2, c_3. Entre c_1 et c_2 d'une part, c_2 et c_3 d'autre part, se trouvent deux petites résistances d'interpolation r', r'.

Les résistances a sont de 100 ohms pour la comparaison des résistances supérieures à 0,1 ohm. Les résistances d'interpolation r' sont alors de 0,1 ohm. Si les résistances à comparer sont comprises entre 0,0001 et 0,1 ohm, on emploie une boîte contenant des résistances de 10 ohms avec résistances d'interpolation de 0,01 ohm.

Quand l'autre borne du galvanomètre est mise en communication avec le milieu d'une grosse lame de cuivre C dont les extrémités plongent dans deux godets de mercure, le dispositif réalise un pont

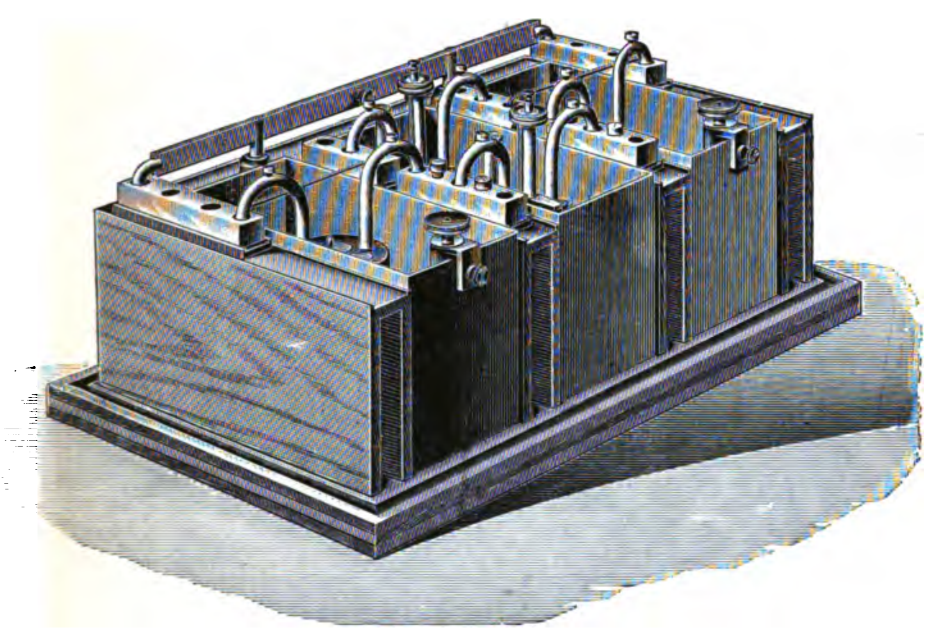


Fig. 128.

de Wheatstone, auquel la pile est reliée de telle façon que la résistance des blocs de raccord *d* et *d'* s'ajoute aux résistances *a*, ce qui est important quand il s'agit de comparer de faibles résistances.

La valeur de la résistance cherchée peut alors être calculée par interpolation des déviations accusées par le galvanomètre relié successivement aux contacts c_1 et c_3.

Pour la comparaison de résistances vis à vis desquelles les résistances de la pièce C et des godets de mercure sont appréciables, ce pont est converti en double pont de Kelvin, en ajoutant au système une boîte B semblable à la boîte A. Le galvanomètre est alors divisé entre les boîtes A et B.

Dans ces conditions, mettons les commutateurs des boîtes A et B d'abord sur les contacts c_1 et c_1', puis sur les contacts c_3 et c_3'.

Soient α et α' les déviations correspondantes du galvanomètre. En interpolant on trouve :

$$x = r\,\frac{1}{\alpha + \alpha'}\left(\frac{a - r'}{a + 2r'}\,\alpha' + \frac{a + 2r'}{a - r'}\,\alpha\right).$$

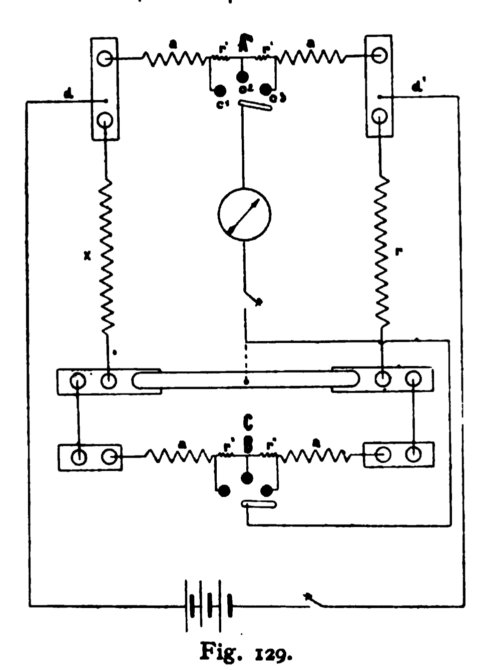


Fig. 129.

On en déduit, en supposant que les erreurs de lecture sont égales et de signes contraires,

$$dx = \frac{r}{\alpha + \alpha'}\left[\frac{a + 2r'}{a - r'} - \frac{a - r'}{a + 2r'}\right]d\alpha$$

et

$$\frac{dx}{x} = \frac{\dfrac{a + 2r'}{a - r} - \dfrac{a - r'}{a + 2r'}}{\dfrac{a - r'}{a + 2r'}\,\alpha' + \dfrac{a + 2r'}{a - r'}\,\alpha}\,d\alpha$$

soit, sensiblement,

$$\frac{dx}{x} = \frac{\dfrac{a + 2r'}{a - r'} - \dfrac{a - r'}{a + 2r'}}{\alpha + \alpha'}\,d\alpha.$$

Chapitre XIV.

MESURE DES CAPACITÉS.

Méthode indirecte par la perte de charge. — Cette méthode est analogue à celle employée pour la mesure des grandes résis-

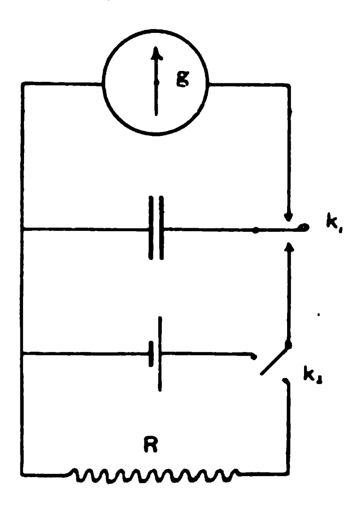


Fig. 130.

tances et peut être utilisée lorsqu'on ne dispose pas d'un condensateur étalon. On charge le condensateur étudié à l'aide d'une pile en manœuvrant la clef de charge k_1 et la clef à deux direc-

tions k_2. On relève la déviation que la différence de potentiel V_0 des armatures détermine dans un électromètre ou bien l'élongation accusée par un galvanomètre balistique g dans lequel on décharge le condensateur. Dans ce dernier cas, on recharge celui-ci aussitôt après la première mesure.

On laisse ensuite le condensateur se décharger dans une grande résistance connue R. Au bout d'un temps t, on estime la différence de potentiel V_t des armatures par le procédé déjà employé. On sait que

$$c = \frac{t}{R \log_e \frac{V_0}{V_t}} = \frac{t}{2,3 \; R \; \text{Log} \frac{V_0}{V_t}},$$

si la résistance d'isolement du condensateur est considérable par rapport à R.

La discussion de la formule conduit aux mêmes résultats que dans le cas de la mesure d'une grande résistance.

Une remarque générale s'applique à toutes les méthodes de mesure des capacités : il faut veiller soigneusement à l'isolement de toutes les parties des circuits, car une négligence sous ce rapport peut amener la décharge partielle ou totale des armatures et, partant, introduire des erreurs grossières dans les résultats.

Méthode indirecte de Jenkin. — On charge le condensateur au moyen d'une pile de force électromotrice e, puis on le décharge dans un galvanomètre. On a

$$c = \frac{q}{e} = \frac{\alpha}{e\,K},$$

K étant la constante balistique. On relève ensuite la déviation δ occasionnée par le courant que le même couple produit dans un circuit de résistance R. En désignant par k la constante permanente du galvanomètre,

$$\frac{\delta}{k} = \frac{e}{R}.$$

On tire de là

$$c = \frac{\alpha}{\delta R} \frac{k}{K} = \frac{\alpha}{\delta R} \frac{T_0}{\pi}.$$

L'erreur qui peut entacher c est la somme des erreurs commises sur α, δ et T_0.

Il faut que la période d'oscillation du galvanomètre soit grande par rapport à la durée de la décharge du condensateur. Pour s'en assurer, on ajoute dans le circuit du galvanomètre une résistance égale à celle de ce dernier. Si, en répétant la mesure, l'élongation balistique ne varie pas, c'est que la condition est satisfaite.

Méthode directe par comparaison. — La méthode par comparaison, dans laquelle on utilise un condensateur étalon, est la plus communément employée.

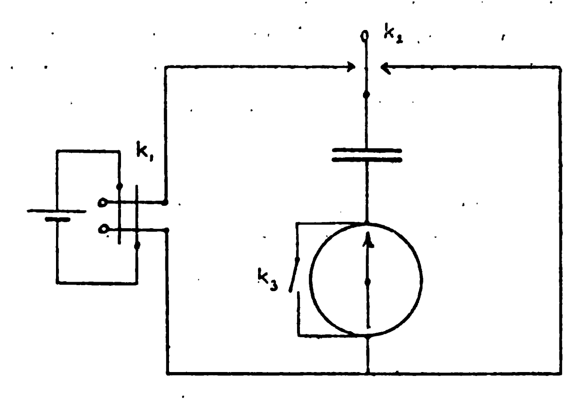


Fig. 131.

Le condensateur étudié est chargé à l'aide d'une pile par l'intermédiaire d'une clef d'inversion k_1 et d'une clef de charge k_2. On lit l'élongation provoquée par le courant de charge dans un galvanomètre. En manœuvrant la clef k_2, on note ensuite l'élongation produite par la décharge. Si les armatures du condensateur sont parfaitement isolées, les deux élongations sont égales; sinon, le courant de perte accroît la première élongation et diminue la seconde : on prend, dans ce cas, l'élongation moyenne. k_3 est une clef de court-circuit destinée à arrêter les oscillations du galvanomètre, si celui-ci est un appareil du type Deprez et d'Arsonval. Il faut avoir soin de relever la clef de décharge avant la clef d'inversion, car si l'on opère en sens inverse le condensateur se vide par cette dernière. On répète les mêmes mesures avec le condensateur étalon. En appelant c et c' les capacités, α et α' les élongations, on a

$$\frac{c}{c'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

De là, on tire

$$\frac{dc}{c} = \frac{\alpha' + \alpha}{\alpha\alpha'} d\alpha = \frac{1 + \frac{\alpha}{\alpha'}}{\alpha} d\alpha,$$

en supposant que les erreurs de lecture s'ajoutent. Il est facile de voir que l'erreur due aux lectures est la plus faible quand la déviation α est la plus grande possible et la déviation α' voisine de α. Au besoin, on peut employer un condensateur étalon gradué, pour égaliser autant que possible les déviations, ou utiliser pour les deux expériences des piles différentes, dont les forces électromotrices sont dans un rapport connu, ou encore adopter des shunts de galvanomètre inégaux en déterminant au préalable le facteur de correction.

Les condensateurs isolés au moyen de diélectriques impurs prennent une charge résiduelle qui prolonge la durée de la charge et de la décharge et entache d'erreur les résultats fournis par la méthode précédente. La capacité propre du diélectrique correspond alors à la quantité d'électricité qui s'écoule au premier instant de la décharge ([1]). Soit q la *charge disponible* ainsi définie et e la différence de potentiel des armatures, on a

$$c = \frac{q}{e}.$$

Pour mesurer cette charge disponible, on remplace le levier de la clef de charge ordinaire par l'une des branches d'un diapason dont les vibrations sont entretenues par un trembleur électrique. Le galvanomètre est disposé dans la branche traversée par le courant de décharge seulement. En appelant n le nombre de décharges effectuées par seconde, on obtient une déviation α due au courant moyen et l'on peut poser

$$i = \frac{q}{t} = nce = \frac{\alpha}{k},$$

k étant la constante permanente du galvanomètre. Pour que l'emploi de cette méthode soit justifié, il faut que, pendant la durée

---

([1]) Eric Gerard, *Leçons sur l'Électricité* ; t. I, chap. VII.

du contact produit par le diapason, le condensateur ait pris sa charge normale. Pour s'en assurer, il convient de faire varier la période de vibration du diapason par des poids pouvant glisser le long de ses branches et de rechercher si un déplacement des poids n'occasionne pas de modification sensible dans le résultat.

Cette variante de la méthode de comparaison n'est pas employée dans les laboratoires industriels pour les câbles dont les diélectriques ont une forte charge résiduelle, car il y a intérêt à connaître cette charge. C'est pourquoi, dans ce cas, on mesure la décharge après une durée d'électrisation de 1 minute environ.

Méthode de Faraday. — On commence par charger le condensateur c et le décharger à travers le galvanomètre. On observe une élongation α telle que

$$\frac{\alpha}{K} = ce.$$

Après l'avoir rechargé, on réunit les deux condensateurs c et c' par la clef k_1, la clef k_2 étant ouverte; puis on décharge dans le

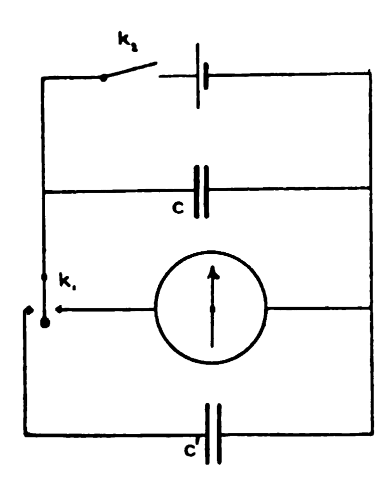


Fig. 132.

galvanomètre la quantité d'électricité qui est restée dans le condensateur c.

En appelant e' la différence de potentiel commune des armatures des deux condensateurs après la réunion, on a

$$e'(c + c') = ec;$$

d'où

$$\frac{\alpha'}{K} = ce' = c\frac{ec}{c + c'}.$$

Il résulte de là que

$$\frac{c}{c'} = \frac{\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

On a vu, dans l'Introduction, que, pour une expression de cette forme, l'erreur relative limite est minima quand $\alpha = 2{,}4\,\alpha'$.

L'erreur n'est pas sensiblement plus grande si l'on adopte le rapport $\frac{\alpha}{\alpha'} = 2$, qui conduit à

$$\frac{dc}{c} = 6\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Méthode de zéro de M. de Sauty. — On adopte un dispositif analogue à celui du pont de Wheatstone, comportant deux résis-

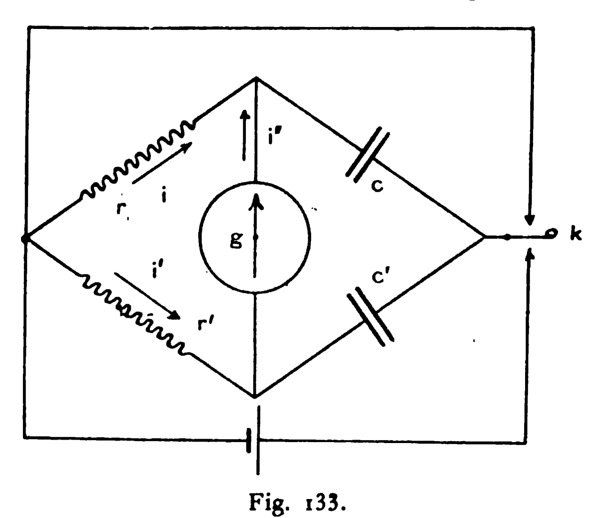


Fig. 133.

tances réglables sans self-induction, r et r', les deux condensateurs à comparer c et c' et un galvanomètre balistique g; une pile est réunie au pont par une clef de charge et de décharge k.

On règle les résistances r et r' jusqu'à ce que, lors de l'abaissement et du relèvement de la clef, le galvanomètre ne dévie plus. On a alors

$$\frac{c}{c'} = \frac{r'}{r}.$$

Pour établir la relation précédente, appelons i, i' et i'' les courants qui, à un instant donné de la décharge des condensateurs, traversent les branches r, r' et g, lorsque l'équilibre n'est pas encore atteint.

En appliquant la seconde loi de Kirchhoff au circuit formé par ces trois branches et en représentant par $\mathfrak{L}$ le coefficient de self-induction du galvanomètre, on a

$$ir - i''g - i'r' = -\mathfrak{L}\frac{di''}{dt}.$$

En multipliant les deux membres de l'équation par dt et en intégrant le premier membre entre les limites o et τ de la durée de la décharge et le second membre entre les valeurs nulles que présente le courant i'' au commencement et à la fin de celle-ci, il vient

$$qr - q''g - q'r' = o.$$

Si l'élongation est nulle, $q'' = o$, d'où

$$qr = q'r',$$

ou

$$cer = c'er'.$$

On déduit de là la relation posée.

Pour déterminer l'erreur limite que comporte la méthode, remarquons que

$$q''g = \frac{\alpha}{K}g = qr - q'r'.$$

Mais

$$q + q'' = ce \qquad \text{et} \qquad q' - q'' = c'e$$

d'où

$$q'' = \frac{\alpha}{K} = \frac{e(cr - c'r')}{g + r + r'}.$$

A une erreur de lecture $d\alpha$ correspond une erreur dc telle que

$$\frac{d\alpha}{K} = \frac{e\,r\,dc}{g + r + r'}.$$

De là, on tire

$$\frac{dc}{c} = \frac{g}{K\,e\,r'\,c'}\,d\alpha + \frac{c' + c}{K\,e\,c\,c'}\,d\alpha.$$

Pour réduire l'erreur relative limite, il convient donc de choisir K, e et r' aussi grands que possible. Il en résulte que r sera grand aussi, puisque r et r' sont dans le même rapport que c' et c. Il est toutefois inutile de prendre pour r et r' des valeurs plus grandes que celles pour lesquelles une variation d'un ohm dans l'une des branches ne produit pas d'élongation sensible au galvanomètre.

Méthode de M. Gott. — La méthode précédente est sujette à plusieurs causes d'erreur, provenant de ce que la self-induction et la capacité des bobines formant les résistances r et r' ne sont géné-

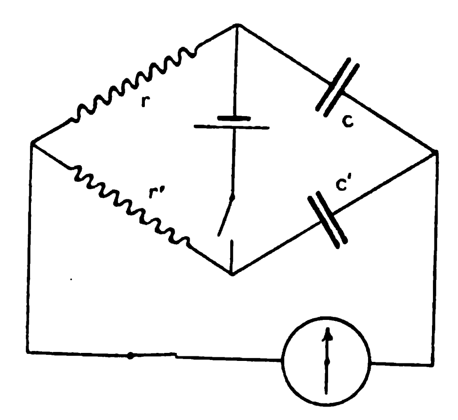


Fig. 134.

ralement pas négligeables et de ce que les condensateurs peuvent donner lieu à des courants de perte entre les armatures. Ce dernier inconvénient se présente toujours lorsqu'on mesure la capacité d'un câble électrique. Dans ce cas, une autre cause d'erreur importante intervient : la durée de la charge d'un câble est beaucoup plus

grande que celle des condensateurs étalons. Il s'ensuit que, si même $qr = q'r'$, les potentiels aux bornes du galvanomètre n'ont pas à chaque instant la même valeur. Le condensateur étalon se chargeant rapidement, le galvanomètre sera traversé, pendant les premiers moments, par un courant dirigé vers ce condensateur ; ensuite le courant se portera vers le câble.

M. Gott a cherché à résoudre ces difficultés en intervertissant, dans la méthode de M. de Sauty, la pile et le galvanomètre, fig. 134. On abaisse d'abord la clef de la pile de manière à laisser le régime permanent s'établir dans les résistances et les condensateurs, puis on abaisse la clef du galvanomètre, afin de vérifier si le potentiel du point de jonction des résistances est égal au potentiel du point de jonction des condensateurs.

On a alors, en appelant i le courant dans les résistances et q la charge des condensateurs,

$$ir = \frac{q}{c} \quad \text{et} \quad ir' = \frac{q}{c'},$$

d'où

$$\frac{r}{r'} = \frac{c'}{c}.$$

Les meilleures conditions d'expérience sont les mêmes que dans la méthode de M. de Sauty.

On évite, par ce procédé, les effets sur le galvanomètre de la self-induction des bobines r et r' et de la durée de charge du câble ; mais le galvanomètre est toutefois traversé par le courant de perte du câble.

Méthode de Lord Kelvin. — Pour supprimer ce dernier inconvénient, Lord Kelvin a adopté la méthode suivante, qui est en usage pour déterminer la capacité des longs câbles.

On charge le câble c' et le condensateur étalon c en abaissant les clefs 1, 2 et 3. En appelant i le courant qui traverse les résistances r et r', les condensateurs c et c' prennent des charges

$$q = c\,i\,r,$$
$$q' = c'\,i\,r'.$$

On relève ensuite les clefs 2, 3 et 1, et l'on abaisse 4 de manière à

permettre aux condensateurs de se décharger l'un dans l'autre; puis on ferme la clef 5, afin d'écouler le résidu de la charge des

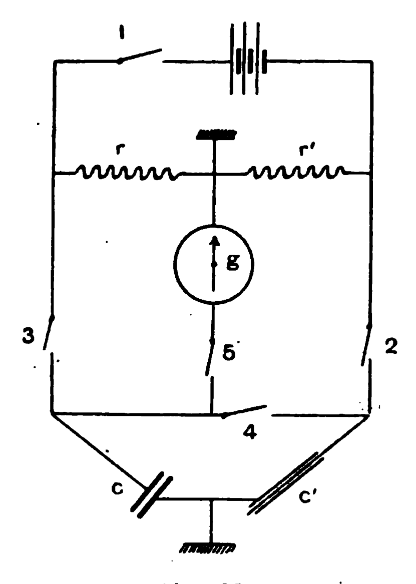


Fig. 135.

condensateurs dans le galvanomètre. En réglant r et r' de telle sorte que ce résidu soit nul, on a

$$c\,r = c'\,r'.$$

Comme dans les méthodes précédentes, on choisit r et r' assez grands pour qu'une différence de 1 ohm dans la valeur de l'une de ces résistances ne cause pas d'élongation appréciable du galvanomètre.

Il est recommandé de manœuvrer les clefs dans l'ordre indiqué, sinon l'on s'expose à ce que les condensateurs se déchargent dans les résistances.

Chapitre XV.

MESURE DES PUISSANCES ÉLECTRIQUES.

Cas d'un courant continu. Wattmètre. — La puissance électrique absorbée dans un conducteur soumis à une différence

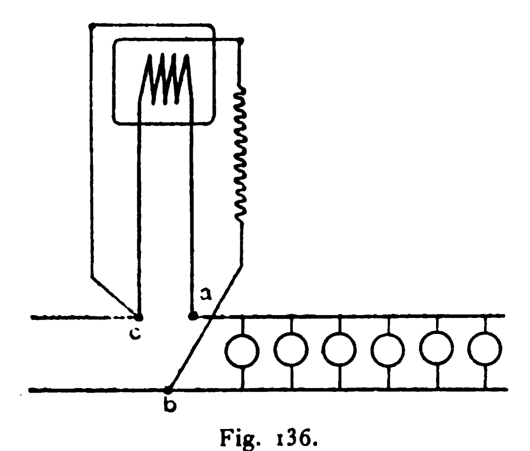


Fig. 136.

de potentiel e et parcouru par un courant i, a pour expression ei, s'il s'agit d'un courant continu et constant.

Ce produit peut être déterminé par voie indirecte, en mesurant séparément les facteurs e et i à l'aide d'une des méthodes indiquées

précédemment ou par voie directe, au moyen d'appareils appelés wattmètres.

Les wattmètres les plus employés sont des électrodynamomètres. Cependant on a transformé en wattmètres des balances de Kelvin, qui constituent d'excellents appareils de contrôle.

Dans un électrodynamomètre, la bobine fixe, composée d'un petit nombre de tours de gros fil, est disposée en série avec le circuit dans lequel est absorbée la puissance à mesurer. La bobine mobile, ordinairement composée de quelques tours de fil plus fin, est mise en tension avec une grande résistance et le tout est raccordé en dérivation par rapport aux points qui limitent le circuit étudié, fig. 136. Appelons r la résistance de la bobine fixe, R la résistance de la bobine mobile et du rhéostat additionnel, e la différence de potentiel des points a b, et i l'intensité du courant qui passe au point a. Le couple électrodynamique qui sollicite la bobine mobile peut être représenté par

$$A\, i \times \frac{e + r\, i}{R}.$$

Il est mesuré par une torsion θ. Si r est suffisamment petit, on peut négliger ri devant e et il vient

$$\theta = \frac{ei}{K}.$$

Pour faciliter les lectures, il est bon d'adjoindre au wattmètre un amortisseur à air ou à liquide.

Lorsque les expériences sont faites très près de dynamos ou de conducteurs parcourus par des courants, dont on craint l'influence, on peut, pour supprimer les perturbations, dédoubler les deux bobines de manière à constituer un système mobile astatique.

Les connexions telles qu'elles sont indiquées dans le croquis amènent, comme on le voit, une légère erreur en trop dans les indications du wattmètre, puisque le voltage aux bornes du circuit dérivé est accru de la chute de tension dans la bobine fixe de l'appareil. Si l'on raccordait le circuit mobile du wattmètre directement à la résistance utile, on commettrait encore une erreur positive, car la bobine fixe serait alors traversée par le courant

utile augmenté du courant dérivé. Le wattmètre fonctionnerait dans ce cas, même si le circuit utile était interrompu, car les deux bobines de l'appareil seraient traversées par un courant.

On détermine la constante K de l'appareil en reliant celui-ci à une résistance connue, traversée par un courant d'intensité déterminée.

On pourra toujours estimer l'erreur relative commise en négligeant ri ; elle a pour expression

$$\frac{i^2 r}{e i} = \frac{ir}{e}.$$

Cas des courants périodiques. — Lorsque la puissance électrique est transportée sous forme de courants périodiques, le choix d'une méthode de mesure exige une attention toute particulière.

Il y a alors deux cas à considérer :

1° Le conducteur qui absorbe la puissance à mesurer a une réactance négligeable. Il en est ainsi avec les lampes à incandescence.

2° La réactance du conducteur n'est pas négligeable.

Si les champs constants n'ont pas d'action sur les bobines traversées par des courants alternatifs, par contre, il faut craindre l'action répulsive exercée par les courants de Foucault engendrés dans les pièces métalliques de consolidation. Il faut diviser ces pièces et éviter les couvercles en métal.

Conducteurs sans réactance. Lorsqu'un conducteur de la première catégorie est soumis à une différence de potentiel périodique, il est le siége d'un courant dont les phases coïncident avec celles de la différence de potentiel. Par suite, la puissance moyenne est égale au produit de la différence de potentiel efficace par le courant efficace.

On peut déterminer séparément l'intensité efficace du courant à l'aide d'un électrodynamomètre et la différence de potentiel efficace par un voltmètre pour courants alternatifs.

Dans l'hypothèse où la puissance considérée est transformée intégralement en chaleur par l'effet Joule, on peut déduire cette quantité de chaleur de l'intensité ou de la différence de potentiel mesurées respectivement par l'indication d'un électrodynamomètre

ou par celle d'un voltmètre convenable. On a, en appelant ρ la résistance, supposée connue, du conducteur sur lequel on expérimente

$$\frac{1}{T}\int_0^T eidt = \rho\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt = \frac{1}{\rho}\frac{1}{T}\int_0^T e^2dt.$$

La méthode la mieux adaptée aux mesures industrielles est celle du wattmètre, qui est indépendante de la loi du courant. Il faut employer un appareil dans lequel la réactance de la bobine mobile et de la résistance additionnelle est négligeable. On arrive à ce résultat en composant la résistance additionnelle de bobines à double enroulement ou de lampes à incandescence, ou encore en utilisant une résistance liquide sans capacité de polarisation sensible.

Le courant qui traverse le circuit dérivé du wattmètre est alors en concordance de phase avec la différence de potentiel, et l'angle de torsion de l'appareil est directement proportionnel à la puissance moyenne

$$\theta = \frac{1}{K}\frac{1}{T}\int_0^T eidt.$$

La constante K est déterminée au moyen d'une résistance traversée par un courant continu.

Mais souvent la réactance de la branche dérivée n'est pas négligeable, lorsque la résistance additionnelle est formée par des bobines. Il en résulte un affaiblissement du courant dans cette branche et un décalage de sa phase sur celle de la différence de potentiel, qui ont pour effet de réduire les indications du wattmètre en dessous de la valeur correspondant à la puissance réellement absorbée par le conducteur ρ.

On pourrait rendre les indications du wattmètre correctes en enroulant la bobine mise en série avec le cadre mobile de telle manière que sa capacité neutralise l'effet de la self-induction du circuit dérivé et qu'ainsi la réactance s'annule. Mais il est plus simple d'employer un électrodynamomètre ordinaire, en se servant en guise de résistance additionnelle de lampes à incandescence, dont la réactance est presque nulle, et de faire passer dans le circuit

de l'enroulement mobile un courant assez intense pour permettre de réduire autant que possible le nombre de spires de cet enroulement.

Pour apprécier l'erreur due à la réactance du circuit de la bobine mobile, on remarquera que le courant dans ce circuit est

$$i_{eff} = \frac{E_{eff}}{R} \cos\varphi,$$

au lieu de

$$\frac{E_{eff}}{R}.$$

I_{eff} désignant l'intensité efficace du courant principal, le couple électrodynamique moyen est proportionnel à $I_{eff}\, i_{eff} \cos\varphi$, car on sait que le produit moyen de deux facteurs sinusoïdaux I et i décalés d'un angle φ est

$$I_{eff}\, i_{eff} \cos\varphi = \frac{E_{eff}\, I_{eff}}{R} \cos^2\varphi.$$

L'erreur relative est donc égale à

$$\varepsilon = \frac{\dfrac{E_{eff}\, I_{eff}}{R} \cos^2\varphi - \dfrac{E_{eff}\, I_{eff}}{R}}{\dfrac{E_{eff}\, I_{eff}}{R}} = - \sin^2\varphi.$$

Elle est essentiellement négative. Pour des angles faibles, on peut remplacer le sinus par la tangente et écrire

$$\varepsilon = - \operatorname{tang}^2\varphi.$$

Exemple. Dans le cas où la réactance du circuit dérivé du wattmètre est exprimée par $\frac{2\pi}{T}\mathfrak{L}$, on a

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{2\pi}{T}\frac{\mathfrak{L}}{R}.$$

Alors, si

$$T = \frac{1}{125} \text{ de seconde},$$

$$R = 3000 \text{ ohms},$$

$$\mathfrak{L} = 0{,}383 \text{ henry},$$

$$\varepsilon = - 0{,}01.$$

Conducteurs avec réactance. Emploi du wattmètre. L'expression de la puissance moyenne est alors de la forme

$$E_{eff} I_{eff} \cos \Phi,$$

Φ représentant l'angle de phase dû à la réactance du conducteur. La bobine fixe du wattmètre possède trop peu de spires pour altérer sensiblement cet angle. Si, comme c'est généralement le cas, l'influence de la capacité des circuits est faible vis-à-vis de celle de la self-induction, il y a un retard de phase du courant sur la différence de potentiel agissante, à la fois dans le circuit principal comprenant l'enroulement fixe du wattmètre et dans le circuit dérivé de celui-ci. Il en résulte une tendance à la concordance des phases du courant dans les deux circuits, ce qui peut avoir pour effet de renforcer les indications de l'instrument au delà de la valeur correspondant à la puissance réelle, contrairement à ce qui se produit dans le cas d'un conducteur sans réactance.

Le courant qui passe dans la bobine mobile a pour intensité efficace $\frac{E_{eff}}{R} \cos\varphi$ et la réaction des deux bobines est proportionnelle à

$$\frac{E_{eff} \cos \varphi}{R} \times I_{eff} \times \cos(\Phi - \varphi).$$

Par suite, l'erreur relative est

$$\varepsilon' = \frac{E_{eff} I_{eff} \cos \varphi \cos(\Phi - \varphi) - E_{eff} I_{eff} \cos \Phi}{E_{eff} I_{eff} \cos \Phi}$$

$$= \cos^2 \varphi + \cos \varphi \sin \varphi \operatorname{tang} \Phi - 1$$

$$= \cos \varphi \sin \varphi \operatorname{tang} \Phi - \sin^2 \varphi.$$

Pour de petites valeurs de φ, on peut écrire

$$\varepsilon' = \operatorname{tang} \varphi \operatorname{tang} \Phi - \operatorname{tang}^2 \varphi = \varepsilon + \operatorname{tang} \Phi \sqrt{-\varepsilon}.$$

Si Φ est positif, ce qui a lieu toutes les fois qu'il n'existe pas de capacité importante dans le circuit principal, l'erreur est négative tant que $\Phi < \varphi$, c'est à dire que les indications de l'appareil sont alors trop faibles. Mais, en général $\Phi > \varphi$ et l'erreur est positive.

Ainsi, avec $\varepsilon = -0,01$ et $\Phi = 60°$, valeur qu'atteint le retard de phase dans les transformateurs fonctionnant à vide, on a

$$\varepsilon' = 0,163.$$

Ce résultat montre qu'avec un wattmètre capable de mesurer à 1 pour 100 près la puissance dans un circuit sans réactance, on peut commettre des erreurs très considérables dans les circuits à forte inductance ; en général, lorsque $\cos \Phi < 0,4$, le wattmètre donne peu d'exactitude.

En résumé, si le circuit dans lequel on mesure la puissance, ainsi que le circuit dérivé du wattmètre ont une réactance positive, les indications de l'instrument sont ordinairement trop fortes ; si le circuit dérivé possède une réactance négative, les indications sont trop faibles.

Si le circuit principal a une réactance négative, le résultat est trop grand ou trop petit, suivant que le circuit dérivé de l'appareil a une réactance négative ou positive.

Enfin, si le circuit principal a une réactance nulle, tandis que celle du circuit dérivé n'est pas négligeable, les indications sont toujours trop faibles.

Pour se faire rapidement une idée de l'exactitude d'un wattmètre, on le branche sur un circuit sans réactance, tel que des lampes à incandescence. On soumet celles-ci à une différence de potentiel de valeur efficace constante et l'on fait croître la fréquence du courant. Si les indications du wattmètre diminuent, c'est que sa réactance n'est pas négligeable.

Mesure de la puissance dans le cas des courants polyphasés. Considérons le cas le plus compliqué qu'on rencontre dans les applications, celui des courants triphasés et supposons d'abord qu'on ait affaire au montage en étoile, fig. 137.

La puissance dépensée dans les 3 branches est, à un moment quelconque,

$$p = I_1 (V_1 - v) + I_2 (V_2 - v) + I_3 (V_3 - v), \qquad (1)$$

les signes des courants et des différences de potentiel étant implicites.

Comme on a, d'autre part, la condition

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0, \qquad (2)$$

on voit que

$$p = I_1\ V_1 + I_2 V_2 + I_3 V_3, \qquad (3)$$

expression qui, par la combinaison de (2) et (3), peut être ramenée à

$$p = I_1\ (V_1 - V_3) + I_2\ (V_2 - V_3). \qquad (4)$$

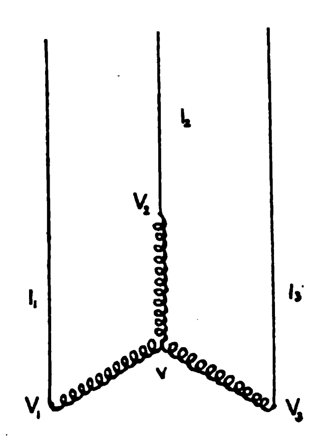


Fig. 137.

Dans le cas du montage en triangle, fig. 138, il vient

$$p = i_1\ (V_1 - V_2) + i_2\ (V_2 - V_3) + i_3\ (V_3 - V_1), \qquad (5)$$

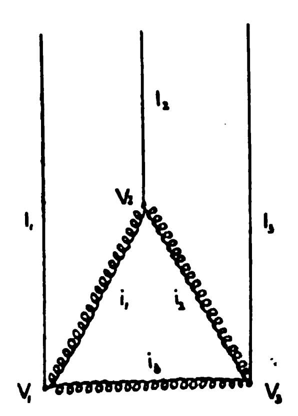


Fig. 138.

avec

$$i_1 + i_2 + i_3 = o,$$

et

$$I_1 = i_1 - i_3,$$
$$I_2 = i_2 - i_1\,;$$

d'où

$$p = I_1 (V_1 - V_3) + I_2 (V_2 - V_3), \qquad (6)$$

équation identique à (4).

Pour obtenir l'expression de la puissance moyenne, il suffit de prendre la somme des moyennes des produits formant les seconds membres des équations (1), (5) ou (6) :

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T I_1 (V_1 - v)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T I_2 (V_2 - v)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T I_3 (V_3 - v)\, dt, \qquad (7)$$

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T i_1 (V_1 - V_2)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T i_2 (V_2 - V_3)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T i_3 (V_3 - V_1)\, dt, \qquad (8)$$

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T I_1 (V_1 - V_3)\, dt + \frac{1}{T}\int_0^T I_2 (V_2 - V_3)\, dt \qquad (9)$$

Les sommes constituant les seconds membres des équations (7) et (8) peuvent être obtenues à l'aide de 3 wattmètres. Si θ, θ' et θ'' sont les indications des trois appareils dont les constantes sont k, k' et k'',

$$P = \frac{\theta}{k} + \frac{\theta'}{k'} + \frac{\theta''}{k''}.$$

On peut combiner les trois wattmètres en un seul, en superposant le long d'un même axe les 3 bobines mobiles et en faisant agir celles-ci respectivement sur les bobines fixes correspondantes. Enfin, si le générateur fournit un courant suffisamment constant et si l'énergie absorbée par les appareils de mesure ainsi que la réactance de ceux-ci peuvent être négligées, un seul wattmètre ordinaire, intercalé successivement dans les trois branches du circuit, peut donner les trois termes de la puissance.

En appliquant l'équation (9), on peut se contenter de deux

wattmètres ou d'un wattmètre double. Il est à remarquer que les deux termes du second membre de cette équation prennent des signes contraires dans le cas de décalages considérables comme ceux des moteurs tournant à vide ; il faut alors prendre la différence des indications des wattmètres, lesquels accusent des déviations inverses. Si l'on emploie un wattmètre double, les actions des enroulements fixes sur les bobines mobiles s'ajoutent ou se retranchent suivant les cas.

Pour rendre compte de l'interversion signalée ci-dessus, considérons un moteur enroulé en étoile ([1]), fig. 139 et 140.

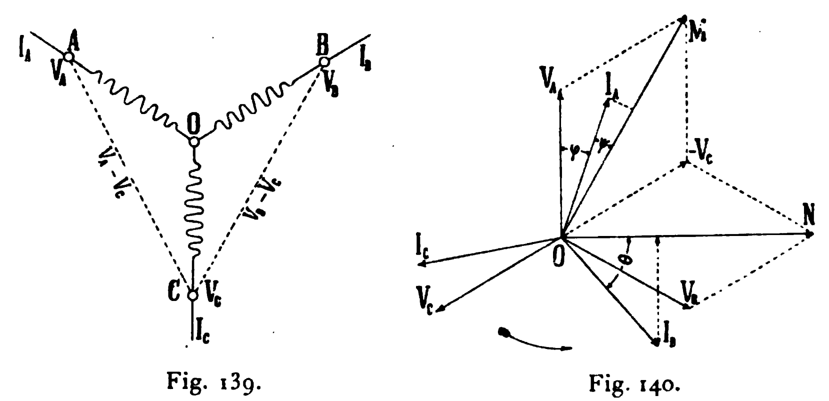


Fig. 139. Fig. 140.

Les valeurs maxima des différences de potentiel entre les points A, B, C et O, sont représentées graphiquement par les vecteurs OV_A, OV_B, OV_C décalés de 120° et les courants maxima dans les trois branches de l'étoile par les vecteurs OI_A, OI_B, OI_C.

Les maxima des différences de potentiel $V_A - V_C$, $V_B - V_C$ s'obtiennent en changeant le sens du vecteur OV_C et en traçant les résultantes OM et ON.

Le wattmètre dont le gros fil est parcouru par le courant I_A et dont le fil dérivé est soumis à la tension $V_A - V_C$ donne l'intégrale

$$\frac{1}{T}\int_0^T (V_A - V_C)\sin at\, I_A \sin(at + \psi)\, dt = \frac{1}{2}(V_A - V_C)\, I_A \cos\psi.$$

([1]) *Bull. de l'Ass. des Ing. Électr. sortis de l'Institut Montefiore*, 1894-95, p. 249.

Le wattmètre traversé par le courant I_B et soumis au voltage $V_B - V_C$ mesure

$$\frac{1}{T}\int_0^T (V_B - V_C) \sin at \, I_B \sin (at - \theta) \, dt = \frac{1}{2} (V_B - V_C) I_B \cos \theta.$$

Il est aisé de constater sur la fig. 140 que, si l'angle de décalage du courant sur la différence de potentiel dans chacune des phases du système est égal à 60°, l'une des intégrales s'annule. S'il est supérieur à 60°, l'intégrale est négative.

Dans la pratique, il n'est guère possible de se tromper, attendu que les résultats obtenus sont manifestement inexacts si l'on a fait l'erreur de signe.

D'ailleurs, si l'on transporte les connexions symétriquement d'une des positions à l'autre, le sens de la déviation de la bobine mobile change, si les signes des intégrales sont différents.

Wattmètres spéciaux. — *Wattmètre Siemens et Halske.* Cet appareil, à lecture directe, donne des déviations proportionnelles aux puissances mesurées et pratiquement indépendantes de la fréquence et de la forme des courants alternatifs, fig. 141.

Le cadre fixe de l'instrument est combiné de manière à créer, dans la région où se meut la bobine mobile, un champ magnétique sensiblement radial, analogue à celui des galvanomètres Deprez et d'Arsonval. A cet effet, le côté supérieur et le côté inférieur des spires de son enroulement sont constitués par des circonférences auxquelles les côtés rectilignes latéraux aboutissent suivant les extrémités d'un diamètre, de telle sorte que le courant principal traverse les circonférences en se dérivant entre leurs moitiés en parallèle. Ces circonférences et les côtés qui les raccordent sont découpés dans une tôle en cuivre de 0,3 mm d'épaisseur et ont une largeur de 14 mm. Les bandes métalliques sont pourvues de rainures destinées à empêcher la formation de courants de Foucault. L'enroulement comporte 32 spires séparées par des épaisseurs de papier du Japon imprégné d'un vernis isolant et groupées différemment en série ou en parallèle suivant l'intensité maxima du courant à transmettre. Quand toutes les spires sont reliées en série,

l'enroulement mesure 0,0374 ohm à 17° C, présente un coefficient de self-induction négligeable de 0,000056 henry et peut supporter 12,5 ampères ; le courant peut atteindre 400 ampères avec toutes les spires connectées en dérivation.



Fig. 141.

La bobine mobile à fil fin comporte 400 spires de fil de cuivre de 0,1 mm de diamètre. Sa résistance est 100 ohms et son coefficient de self-induction 0,0088 henry. Elle est mobile entre pointes, dirigée par deux ressorts spiraux enroulés en sens inverses et pourvue d'un amortisseur à air constitué par un disque à bords élargis coulissant dans un tube courbe fermé à l'un des bouts. En vue de rendre négligeable l'influence de la température et de la self-induction de la bobine mobile, ainsi que pour obtenir une constante de proportionnalité convenable, l'enroulement à fil fin est muni d'un shunt et d'une résistance en série, tous deux en manganine et

enroulés en double, qui portent la résistance de l'ensemble à 1 000 ohms. Dans ces conditions, une différence de potentiel de 30 volts peut être appliquée au système. Pour les voltages supérieurs, on ajoute en tension des résistances supplémentaires non-inductives en manganine, à raison de 1 000 ohms par 30 volts, de manière à maintenir l'intensité du courant dérivé inférieure à 0,03 ampère.

La position relative de la bobine mobile et du cadre fixe changeant avec la puissance à mesurer, il importe que le coefficient d'induction mutuelle des deux enroulements reste négligeable dans toutes les positions. D'une valeur de 0,00016 henry, quand l'index de l'instrument est au zéro de la graduation, ce coefficient descend à 0,00002 henry quand l'aiguille marque 90°, pour remonter jusque 0,00015 henry pour la déviation maxima de 150°.

La puissance moyenne P d'un courant efficace I agissant sous une différence de potentiel efficace V avec un retard de phase φ, est

$$P = V\,I\cos\varphi.$$

Si, dans le circuit dérivé, de résistance R, du wattmètre dont le cadre fixe est parcouru par le courant I, la réactance détermine un retard ψ du courant efficace i sur la différence de potentiel V,

$$i\,R = V\cos\psi.$$

Soit C le facteur de réduction du wattmètre étalonné à l'aide d'un courant continu et α la déviation lue ; on a

$$I\,i\cos\left(\varphi - \psi\right) = \frac{C}{R}\alpha,$$

d'où

$$P = C\alpha\,\frac{\cos\varphi}{\cos\psi\cos(\varphi - \psi)}$$

ou, très approximativement, l'angle ψ étant très petit grâce à l'addition de résistances en série avec la bobine mobile,

$$P = C\alpha\,\frac{\cos\varphi}{\cos(\varphi - \psi)}.$$

Avec le wattmètre Siemens et Halske, la négligence du facteur de correction $\frac{\cos\varphi}{\cos(\varphi - \psi)}$ n'entraîne, en général, qu'une erreur tout à fait négligeable, ainsi qu'il résulte du tableau suivant qui renseigne

approximativement, en pour 100, l'écart entre $C\alpha$ et P correspondant à diverses valeurs de φ et du voltage agissant :

VOLTS	φ				
	0°	20°	40°	60°	80°
50	0,00	0,05	0,09	0,24	0,78
100	0,00	0,02	0,06	0,12	0,40
500	0,00	0,01	0,02	0,03	0,08
1 000	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04
2 000	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02

Wattmètre Arno. Pour les tableaux de distribution, il existe des wattmètres à lecture directe, basés sur le principe de l'électrodynamomètre ou sur les champs tournants. La disposition suivante, imaginée par M. Arno, permet de mesurer aisément la puissance dans un circuit triphasé dont les charges sont symétriques. On a vu précédemment, fig. 139 et 140, que la différence de potentiel dans une des branches OA d'un circuit triphasé est en avance de 90° sur la différence de potentiel $V_B - V_C$. Le courant I_A est donc en avance de $(90 - \varphi)^o$ sur $V_B - V_C$. Si l'on imagine un dispositif à disque tournant tel que celui de Ferraris, dans lequel une bobine ampèremétrique traversée par le courant I_A fait un angle de 90° avec une bobine voltmétrique soumise à la tension $V_B - V_C$, ces deux bobines engendrent un champ tournant et le disque, situé à l'intérieur des bobines, est sollicité par un couple en rapport avec la puissance totale dépensée dans le circuit triphasé. En employant un ressort antagoniste, on peut graduer l'appareil empiriquement comme wattmètre.

M. Arno a transformé cet instrument en compteur d'énergie en laissant tourner le disque et en totalisant ses révolutions.

Méthode de MM. Ayrton et Sumpner. — Voici une méthode qui permet de déterminer, à l'aide de 3 voltmètres et d'un ampèremètre pour courants alternatifs, la puissance consommée dans

une résistance R à réactance. On dispose en série avec R une résistance sans réactance r, composée, par exemple, de lampes à incandescence. Soient v_1 la différence de potentiel instantanée aux bornes de R et v_2 la différence de potentiel aux extrémités de r au même instant. La chute de tension totale occasionnée par R + r est, au moment considéré,

$$v = v_1 + v_2. \quad (1)$$

Si i est l'intensité correspondante du courant, la puissance à mesurer est, à l'instant considéré,

$$p = i\,v_1 = \frac{v_2}{r} v_1.$$

Mais on tire de (1)

$$v_1 v_2 = \frac{1}{2}\left(v^2 - v_1^2 - v_2^2\right);$$

d'où

$$p = \frac{1}{2r}\left(v^2 - v_1^2 - v_2^2\right).$$

La puissance moyenne absorbée est

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt$$

$$= \frac{1}{2rT}\left(\int_0^T v^2\,dt - \int_0^T v_1^2\,dt - \int_0^T v_2^2\,dt\right)$$

$$= \frac{1}{2r}\left(V^2 - V_1^2 - V_2^2\right). \quad (2)$$

Dans cette formule V, V_1, V_2 représentent les différences de potentiel efficaces aux extrémités de R + r, R et r. Si l'on ne connaît pas r, il suffit de mesurer l'intensité efficace I du courant à l'aide d'un électrodynamomètre. On a, en remarquant que $I = \frac{V_2}{r}$,

$$P = \frac{I}{2V_2}\left(V^2 - V_1^2 - V_2^2\right).$$

Si l'on est certain de la constance du courant, les trois lectures peuvent être faites à l'aide du même voltmètre. Soient

$$V^2 = \frac{\alpha}{K}, \qquad V_1^2 = \frac{\alpha_1}{K}, \qquad V_2^2 = \frac{\alpha_2}{K},$$

α, α_1, α_2 étant les lectures du voltmètre ; on a

$$P = \frac{\alpha - \alpha_1 - \alpha_2}{2 K r}.$$

Des erreurs de lecture $d\alpha = - d\alpha_1 = - d\alpha_2$ entraînent une erreur limite

$$dP = \frac{3\, d\alpha}{2 K r};$$

d'où

$$\frac{dP}{P} = \frac{3\, d\alpha}{\alpha - \alpha_1 - \alpha_2}.$$

Pour trouver les meilleures conditions d'expérience, supposons que α soit la plus grande lecture possible au voltmètre et cherchons le rapport $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = n$ le plus favorable.

L'erreur $\frac{dP}{P}$ sera minima pour $\alpha_1 + \alpha_2$ minimum.

V_1 et V_2 ont pour résultante géométrique V, de sorte que, pour un angle de phase φ, on a

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2 V_1 V_2 \cos\varphi$$

ou

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + 2\sqrt{\alpha_1 \alpha_2} \cos\varphi;$$

d'où

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha - 2\sqrt{\alpha_1 \alpha_2} \cos\varphi$$

et

$$\alpha_2 (1 + n) = \alpha - 2 \alpha_2 \sqrt{n} \cos\varphi.$$

Il en résulte que

$$\alpha_2 = \frac{\alpha}{1 + n + 2\sqrt{n}\cos\varphi}.$$

Par suite

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha_2 (1 + n) = \frac{\alpha (1 + n)}{1 + n + 2\sqrt{n}\cos\varphi}.$$

Pour rendre cette quantité minima, il faut que $n = 1$. Alors

$$\frac{dP}{P} = \frac{3\, d\alpha}{\alpha - 2\alpha_2} = \frac{3(1 + \cos\varphi)}{\cos\varphi} \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Cette expression montre que l'erreur croît avec φ et qu'elle peut atteindre une valeur importante dans les mesures effectuées sur des transformateurs fonctionnant à circuit ouvert.

Méthode de M. Fleming. — Pour que la méthode précédente soit applicable, il faut disposer d'une différence de potentiel presque double de celle qu'absorbe la résistance utile, car on a, en appelant φ l'angle de phase entre V_1 et V_2,

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2\, V_1 V_2 \cos\varphi.$$

Pour tourner cette difficulté, M. Fleming place la résistance sans réactance r en dérivation par rapport à la résistance à réactance R,

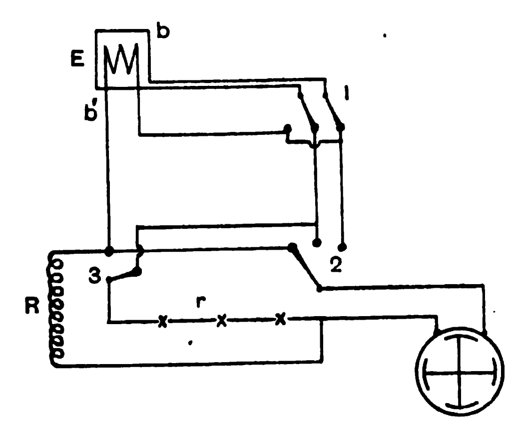


Fig. 142.

et mesure le courant efficace total I, le courant efficace I_1 et le courant efficace I_2 qui traversent respectivement R et r.

En raisonnant comme ci-dessus, on obtient

$$P = \frac{r}{2}\left(I^2 - I_1^2 - I_2^2\right) = \frac{V}{2\, I_2}\left(I^2 - I_1^2 - I_2^2\right).$$

L'erreur relative sur P est minima lorsque $I_1 = I_2$, ce qui entraîne la nécessité de disposer d'un courant presque double du courant absorbé par le circuit soumis à l'essai.

Le grand nombre de lectures que comportent les deux méthodes que nous venons d'étudier amène des erreurs qui peuvent devenir considérables en s'accumulant. De plus, par suite des irrégularités inévitables dans le fonctionnement des alternateurs, il convient de faire simultanément les lectures, ce qui nécessite l'emploi de trois ou quatre appareils de mesure et exige de nombreuses observations.

Lorsque l'alternateur, utilisé comme source de courant, fournit une différence de potentiel constante, les trois déterminations d'intensités peuvent être faites au moyen du même électrodynamomètre. Le montage de la fig. 142, dû à M. Behn-Eschenburg, permet de faire très rapidement les mesures que comporte la détermination de la puissance absorbée. Ce montage comprend les commutateurs 1, 2 et 3. Le commutateur 1 sert à intervertir le courant dans la bobine mobile de l'électrodynamomètre E, afin d'obtenir des déviations de même sens. Les connexions figurées permettent de relever le courant I_2 qui passe dans la résistance sans réactance *r*. Cette résistance ayant été déterminée à chaud par des mesures préalables, on connait ainsi la différence de potentiel efficace développée par l'alternateur. En amenant la manette 2 sur la touche médiane, on mesure le courant I_1 dans R. Enfin, en reculant en outre la manette 3 vers la gauche, on mesure le courant total I.

On transforme l'électrodynamomètre en wattmètre en disposant la manette 2 sur la touche de droite et en tournant la manette 3 vers la droite. Le courant qui traverse la bobine mobile *b* passe alors dans la résistance *r* et la bobine fixe *b'* est en série avec la résistance R. La déviation mesure donc la puissance moyenne dépensée dans celle-ci.

Chapitre XVI.

MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

Coulombmètres et Joulemètres. — Dans une distribution électrique, la redevance doit être calculée d'après la quantité d'énergie utilisée. Dans la plupart des réseaux à courant continu, la distribution s'effectue sous une tension sensiblement constante et l'énergie disponible est proportionnelle à la quantité d'électricité fournie. Il suffit, dans ce cas, de disposer un appareil qui totalise cette quantité, pour obtenir une base de taxation convenable. Il résulte de là que, dans ces réseaux, les compteurs peuvent se réduire à des mesureurs de quantité d'électricité ou *coulombmètres*.

Au début des distributions électriques on s'est même contenté de simples *compteurs de temps*, dont le totalisateur, déclanché lors de l'établissement du courant, enregistre un nombre proportionnel à la durée de la fermeture du circuit. Il est clair qu'un tel appareil ne peut convenir que dans une installation utilisant une puissance invariable.

Dans les distributions par courants alternatifs, où le rapport du coefficient de self-induction à la résistance des récepteurs est variable, le retard de phase du courant varie également. Par suite, l'expression de la puissance électrique alternative, qui est $E_{eff} I_{eff} \cos \varphi$ dans le cas de courants sinusoïdaux, montre que, pour une différence de potentiel efficace constante, l'énergie fournie n'est pas proportionnelle à la quantité d'électricité débitée. Dans ce cas, les *joulemètres* seuls donnent des indications correctes.

L'emploi des compteurs d'énergie tend à se généraliser, parce que, même dans les distributions ordinaires à courants continus, le voltage présente des variations auxquelles il est utile d'avoir égard.

Les compteurs d'énergie sont des appareils à intégration intermittente ou à intégration continue.

Dans le premier cas, l'instrument comporte un wattmètre dont la déviation indique à chaque instant la puissance utilisée. Un mécanisme spécial, mis en mouvement à des intervalles de temps égaux et rapprochés, fait avancer périodiquement les rouages totalisateurs d'une quantité proportionnelle à la puissance susdite.

Dans les appareils de la seconde classe, un organe mobile, qui peut être un petit moteur électrique, avance d'une manière continue proportionnellement à l'énergie dépensée.

Les distributions à trois conducteurs, de même que les réseaux polyphasés, nécessitent soit autant de compteurs qu'il y a de circuits, soit des compteurs à enroulements multiples.

Dans le cas d'une distribution par courants continus à 3 fils, on utilisera par exemple deux enroulements fixes parcourus par les courants des fils extrêmes et agissant sur un enroulement mobile mis en dérivation sur ces fils. Le couple résultant est alors proportionnel à la puissance totale des deux branches du réseau.

Avec les courants diphasés, on adopte 2 compteurs distincts ou l'on réunit 2 appareils en un seul dans lequel les deux couples composants agissent sur l'axe du totalisateur.

Quand il s'agit de courants triphasés, on peut, comme on l'a vu au chapitre précédent, se contenter également de 2 compteurs, ou même d'un seul appareil en actionnant par les deux mécanismes le même axe totalisateur. Dans ce dernier cas, on évite l'erreur qui pourrait résulter de l'antagonisme des deux couples électrodynamiques en jeu.

En général, les bons systèmes de compteurs donnent une approximation de 0,01 dans les essais de laboratoire, effectués dans les conditions de puissance maxima. Mais, dans l'application, l'erreur s'élève à 0,02 et même à 0,05 lorsque la consommation est faible.

Coulombmètre Edison. — Dans l'hypothèse d'un courant continu, le voltamètre est tout naturellement indiqué, puisque le dépôt électrolytique est proportionnel à la quantité d'électricité

qui a traversé cet appareil. M. Edison a employé un voltamètre à sulfate de zinc et à électrodes de zinc. Afin d'éviter l'introduction d'une résistance trop considérable dans le circuit principal, le courant qui alimente les récepteurs traverse une bande de maillechort R. Les voltamètres V, V′ sont dérivés sur cette bande ; chacun d'eux est en série avec une bobine de fil de cuivre *r*, *r′*. La résistance d'un des voltamètres et de la bobine additionnelle est calculée de manière que l'électrolyte soit traversé par la millième partie du courant d'alimentation. Le but des bobines *r*, *r′* est de compenser les variations de résistance de l'électrolyte : lorsque la température

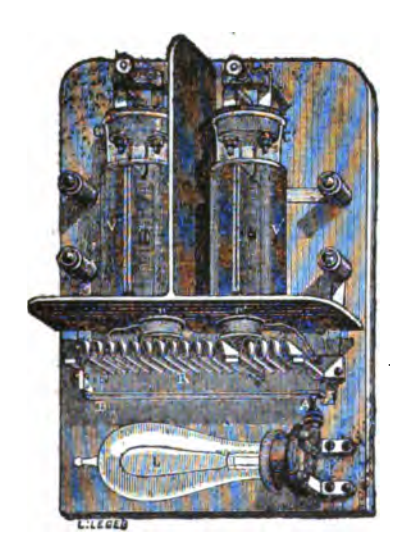


Fig. 143.

change, la résistance du liquide varie en sens inverse de celle du cuivre, et des mesures sont prises pour qu'il y ait une exacte compensation. Afin d'empêcher la congélation du liquide, une bilame B ferme le circuit d'une lampe L, lorsque la température descend trop fortement. La lampe reste allumée jusqu'à ce que la chaleur qu'elle dégage ait ramené la bilame dans la position normale. Chaque mois, un contrôleur retire un des voltamètres qu'il porte à l'usine, afin de vérifier l'accroissement de poids de la cathode ; pendant ce temps, l'autre voltamètre totalise le courant utilisé par l'abonné.

l'autre du balancier magnétique, fig. 146. Les mécanismes de ces horloges sont reliés par un train d'engrenages différentiels qui totalise les différences de vitesse des deux mouvements sur une série



Fig. 146.

de cadrans. Les changements de température agissant également sur les deux balanciers n'influencent pas sensiblement le compteur.



Fig. 147.

On voit dans un coin de la boîte un fil à plomb servant à mettre l'appareil de niveau.

Les indications de l'instrument dépendent de la permanence du magnétisme du balancier de droite. Un courant intense, provoqué par exemple par un court-circuit momentané dans l'installation, suffit parfois pour modifier profondément l'aimantation du barreau. De plus, il est assez facile de frauder en disposant un aimant dans le voisinage du compteur de manière à annuler l'effet du courant.

Lorsqu'il s'agit de totaliser l'énergie absorbée par un circuit ou simplement de desservir une distribution par courants alternatifs,



Fig. 148.

on adopte une combinaison reposant sur le principe du wattmètre, fig. 147. La bobine fixe, formée de gros fil et parcourue par le courant utilisé, est placée horizontalement. A l'intérieur de cette

bobine oscille une bobine de fil fin supportée par le balancier de droite à l'aide d'un étrier et reliée aux points d'entrée et de sortie du circuit desservant les récepteurs. La variation d'allure des deux mouvements d'horlogerie est proportionnelle à l'action mutuelle des deux bobines, c'est à dire à la puissance électrique moyenne.

Dans le modèle le plus récent du compteur Aron, fig. 148, les balanciers, qui ont été raccourcis pour accélérer les oscillations et augmenter ainsi la sensibilité, sont terminés chacun par une bobine mise en dérivation sur les conducteurs principaux. Les bobines fixes sont traversées, en sens contraires, par le courant d'utilisation, de manière à produire une accélération d'un côté et un ralentissement de l'autre et à entraîner la minuterie proportionnellement à la différence des nombres de battements des pendules.

Comme il est impossible d'arriver au synchronisme parfait des deux balanciers à vide, M. Aron a eu l'idée d'intervertir périodiquement le courant dans les deux bobines mobiles, ce qui compense les erreurs et soustrait le système aux influences magnétiques extérieures.

En outre, chaque mouvement de l'inverseur de courant provoque le remontage automatique des ressorts des mécanismes d'horlogerie.

Dans le cas des distributions à 3 conducteurs par courants continus, les deux bobines fixes sont intercalées dans les conducteurs extrêmes et les bobines mobiles dérivées sur ces conducteurs.

Pour les distributions triphasées, on effectue les liaisons indiquées au chapitre précédent. Des interversions automatiques s'effectuent comme avec les courants simples.

Joulemètres-moteurs. Système E. Thomson. Système Vulcain. — On doit à M. E. Thomson un joulemètre à intégration continue convenant également aux courants continus et aux courants alternatifs, fig. 149. Le principe de ce système avait été indiqué par MM. Ayrton et Perry. Deux bobines de gros fil, traversées par le courant de circulation, servent d'inducteurs à une bobine mobile de fil fin à laquelle on ajoute une résistance extérieure sans self-induction et qu'on place en dérivation sur le circuit utile. Un commutateur, analogue à celui de Gramme, est disposé sur l'axe de rotation vertical de la bobine de fil fin, qui prend un

mouvement rotatoire sous l'influence d'un couple électrodynamique proportionnel aux watts consommés et équilibré, lorsque la vitesse de régime est atteinte, par la réaction des courants de



Fig. 149.

Foucault développés dans un disque en cuivre entraîné entre les pôles d'aimants permanents. L'appareil constitue donc un moteur électrique dont la puissance est absorbée, sous forme de chaleur, par un frein à disque de Foucault. Le couple retardateur est proportionnel au carré du flux magnétique fourni par les aimants. Les aimants qui commandent l'amortissement doivent donc être très constants. Afin de compenser les frottements, on a muni les inducteurs d'un enroulement supplémentaire en fil fin, disposé en série avec l'induit, parcouru par le courant dérivé et produisant un couple égal à celui des frottements. Le nombre de révolutions de cet induit sans fer est enregistré par les aiguilles des cadrans supérieurs.

Pour les distributions à conducteurs multiples, on adopte des combinaisons analogues à celles décrites au sujet des compteurs Aron.

L'instrument consomme 7,5 watts lorsque la puissance utilisée est 2 500 watts; il enregistre dès que cette puissance atteint 10 watts. Après un court-circuit, il arrive que les aimants amortisseurs sont modifiés par les courants excessifs qui ont traversé les inducteurs.

Le joulemètre Vulcain est également un compteur-moteur, dans lequel diverses modifications ont été introduites.

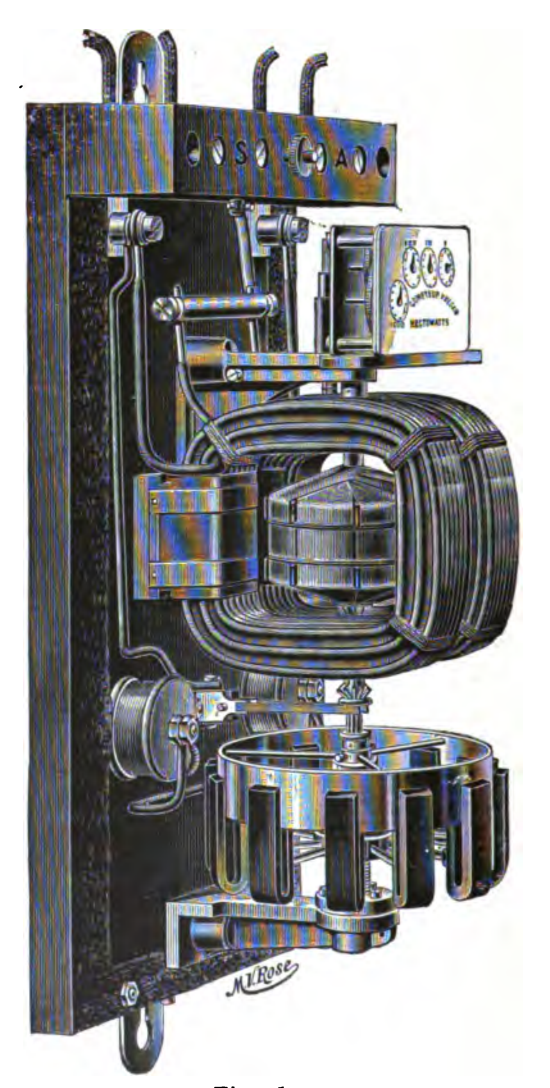


Fig. 150.

L'induit du petit moteur repose sur des saphirs montés sur des ressorts à boudin qui s'opposent au serrage excessif des pointes et

diminuent les frottements. Le frein électromagnétique comporte un cylindre tournant dans une couronne d'aimants, dont la hauteur peut être réglée de manière que les indications de l'appareil soient conformes à la constante inscrite. Un compteur de 22 kilowatts ne prend que 30 watts environ à vide.

On tare les compteurs-moteurs en déterminant l'énergie correspondant à un nombre donné de tours de celui des mobiles dont la vitesse est la plus grande. L'examen du système d'engrenages reliant ce mobile au totalisateur fait connaître le nombre de tours du premier que représente une division du cadran des unités.

Ainsi, dans certains compteurs E. Thomson, il faut 100 révolutions de l'induit du moteur pour faire avancer l'aiguille des unités d'une division. La constante de ces appareils est donc égale au nombre de watts-heures correspondant à ce nombre de tours. Si la constante trouvée diffère de celle renseignée par le constructeur, on peut la ramener à cette valeur en modifiant la position des aimants permanents.

Compteur Ferraris. — Ce compteur, applicable aux courants alternatifs, comprend un anneau en fer *a*, fig. 151, présentant 4 pôles intérieurs saillants, dont deux, *f*, *f*, sont excités par le courant principal de circulation et les deux autres, *e*, *e*, par un courant dérivé à travers un circuit de réactance suffisante pour être décalé d'environ 90° par rapport à la tension utile.

Les bobines produisent un champ magnétique tournant concentré par un anneau de fer fixe *c*, autour duquel un tambour d'aluminium *b* pivote sur un axe *d*. Un amortisseur à aimants produit le couple antagoniste.

Le nombre de révolutions du tambour entraîné par le champ est totalisé par un compteur à cadrans.

L'appareil ne consomme que 1 watt dans le circuit dérivé, pour une tension efficace de 120 volts. Il reste au repos lorsque le courant d'utilisation est nul et commence à tourner lorsque celui-ci atteint 0,25 pour 100 de sa valeur limite.

En pleine charge, l'erreur maxima est de 3 pour 100.

Cet appareil n'est pas influencé par les aimants extérieurs et les vibrations. Il doit être étalonné pour la fréquence particulière des courants à mesurer.

Dans les circuits à courants triphasés où la charge est inégalement répartie, on fait usage de 2 compteurs semblables dont les bobines

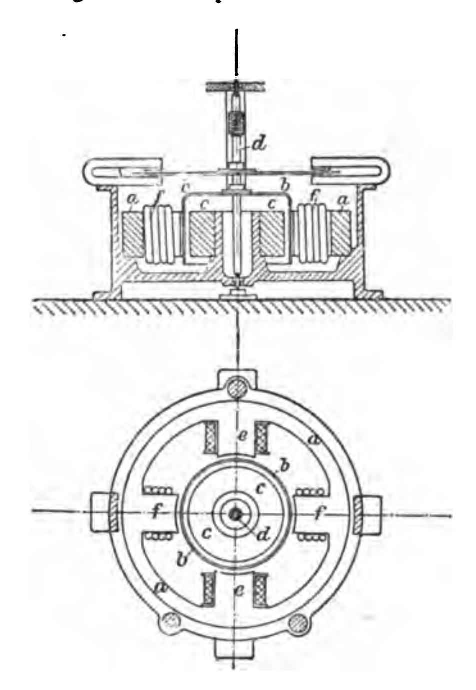


Fig. 151.

à gros fil sont insérées dans 2 des conducteurs de ligne et les enroulements à fil fin dérivés respectivement entre ceux-ci et le 3e conducteur.

Compteurs à intégration discontinue. Compteur Frager. — Les joulemètres Frager comprennent 3 parties distinctes :

1° Un wattmètre dont la déviation est proportionnelle à la puissance utilisée ;

2° Un mécanisme communiquant un mouvement de rotation lent et continu à une came qui rencontre l'aiguille de l'appareil précédent pendant un temps variable avec l'amplitude de la déviation ;

3° Un compteur à cadrans, mis en mouvement pendant toute la durée du contact de la came avec l'aiguille indicatrice.

Il résulte de cette combinaison que les cadrans enregistrent des nombres proportionnels aux produits par le temps de la puissance indiquée, c'est à dire totalisent l'énergie fournie.

Ces appareils peuvent obéir à des courants très faibles; ils ne présentent pas de frottements comme les compteurs-moteurs.

Tarification de l'énergie électrique. Système Wright. Système Brown et Routin. — Le premier système de tarification employé est celui du tarif à forfait, d'après lequel l'abonné paie une redevance fixe, quelle que soit la consommation.

On a ensuite eu recours au compteur avec tarif uniforme ou échelle de réduction proportionnelle à la consommation; ce système n'offre d'avantages que pour les clients importants.

On a aussi proposé d'exiger une somme fixe jusqu'à concurrence d'une consommation déterminée; puis, au delà de celle-ci, une redevance proportionnelle à la consommation supplémentaire.

Dans quelques villes, on a adopté la combinaison suivante qui engage les abonnés à augmenter la demande moyenne de courant. Soit une installation privée pouvant absorber au maximum 10 kilowatts. On fait payer à raison de 1 fr. les 10 premiers kilowatts-heures journaliers et de fr. 0,10 les kilowatts-heures suivants; en sorte que, si le compteur marque au bout du mois 500 kilowatts-heures, la taxe est de $300 \times 1 + 200 \times 0{,}1 = 320$ francs. Une consommation mensuelle de 1 000 kilowatts-heures n'aurait coûté que $300 \times 1 + 700 \times 0{,}1 = 370$ francs.

Tous ces systèmes présentent le défaut suivant: à l'heure où la dépense d'énergie pour l'éclairage est maxima, l'énergie demandée par les moteurs s'y ajoute. Il conviendrait d'engager les industriels à diminuer le maximum de la puissance absorbée; or, les systèmes de tarification indiqués plus haut ne tendent pas à abaisser la plus grande ordonnée du diagramme des puissances. Le système Wright remédie à cet inconvénient.

Dans ce système, une première taxe est appliquée à une partie de l'énergie consommée proportionnelle au maximum de la puissance totale demandée et le reste de la consommation n'est frappé que d'une taxe relativement modique. Un compteur ordinaire totalise l'énergie consommée, tandis qu'un appareil spécial, connu sous le nom d'indicateur de Wright, marque la puissance maxima utilisée par l'abonné.

L'indicateur de Wright, fig. 152, comporte un tube en U terminé par deux ampoules fermées et sur lequel est branché un tube gradué fermé par le bas. Dans le tube U se trouve un liquide coloré. Un ruban en platinoïde, parcouru par le courant total de l'abonné,

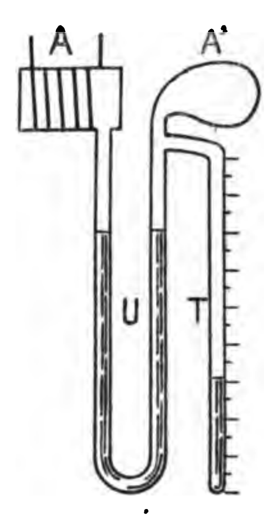


Fig. 152.

entoure l'ampoule A et provoque par son échauffement la dilatation de l'air de celle-ci, ce qui entraîne le déversement, dans le tube gradué T, d'une partie du liquide d'autant plus grande que le courant a été plus intense. L'échauffement de l'air n'étant pas très rapide, un courant momentané intense, tel qu'en produit un court-circuit, n'a pas d'action sur l'appareil. La hauteur du liquide dans le tube T marque l'intensité maxima atteinte par le courant pendant la durée du fonctionnement de l'instrument, attendu que ce tube ne reçoit de liquide que si le courant atteint une intensité supérieure aux valeurs antérieures. Le contrôleur vérifie l'instrument, par exemple, chaque mois et le fait ensuite basculer de manière à provoquer la rentrée du liquide dans le tube U. La graduation est faite empiriquement pour chaque appareil.

Le système Wright, employé à Brighton, a produit d'excellents résultats. Il a toutefois l'inconvénient de mettre sur le même rang les abonnés qui ont leur consommation maxima le jour et ceux qui l'ont le soir.

Le meilleur moyen d'engager les consommateurs à diminuer la demande d'énergie aux moments de forte charge de l'usine consiste en une tarification différente aux heures du jour et aux heures du soir; ce qui peut s'obtenir en faisant usage de deux compteurs qui sont mis en action à des heures convenables par un mécanisme spécial commandé de l'usine, ou d'un seul compteur analogue à celui imaginé par MM. Brown et Routin. Dans ce compteur, à enregistrement intermittent, des signaux, donnés par une horloge de la station centrale et transmis par des courants alternatifs dans une distribution à courants continus ou inversement, font avancer le totalisateur plus rapidement pendant les heures du soir que pendant la journée.

Chapitre XVII.

MESURE DES DIFFÉRENCES DE PHASE.

Méthode de Blakesley. — L'angle de phase entre une différence de potentiel sinusoïdale et le courant qui en résulte dans un conducteur à réactance est donné par la comparaison entre les watts mesurés, comme on l'a vu plus haut, à l'aide du wattmètre et les watts correspondant au produit de l'intensité efficace par la différence de potentiel efficace. Ce dernier produit est $E_{eff}\ I_{eff}$ et l'indication du wattmètre est la mesure du produit $E_{eff}\ I_{eff} \cos\varphi$, dans l'hypothèse de courants sinusoïdaux. Le rapport fait connaître $\cos\varphi$, d'où φ. Si les grandeurs ne sont pas sinusoïdales, c'est le *facteur de puissance* que renseigne le rapport ci-dessus.

Pour déterminer l'angle de phase entre deux courants, M. Blakesley a proposé une méthode reposant sur l'emploi de trois électrodynamomètres. L'un des courants traverse le premier appareil et l'une des bobines du deuxième, le second courant parcourt la seconde bobine et le troisième appareil.

L'indication du deuxième instrument mesure $I_{eff}\ I'_{eff} \cos\varphi$, tandis que les deux autres électrodynamomètres donnent I_{eff} et I'_{eff}. On déduit de là la valeur de $\cos\varphi$.

Méthode graphique de M. Janet pour déterminer la différence de phase entre une différence de potentiel et un courant. — Sur un tambour d'enregistreur, on tend une feuille de papier imbibé d'une solution de ferro-cyanure potassique et d'azotate ammonique (parties égales des solutions saturées et 6 parties d'eau). Si l'on appuie sur le papier un style d'acier à pointe un peu émoussée et si l'on fait passer un courant périodique à travers le papier par l'intermédiaire du style, on observe, chaque fois que le potentiel de la pointe dépasse une certaine valeur positive, une trace bleue due à la décomposition du cyanure. En donnant au tambour un mouvement de rotation et en réglant convenablement la différence de potentiel entre le style et le tambour, on obtient une succession de traits courts, dont le nombre permet de déduire la période du courant alternatif, si l'on connaît la vitesse de rotation du tambour. Pour obtenir un enregistrement net, le papier, après avoir trempé pendant quelques heures dans la solution, est tendu et séché imparfaitement par un papier buvard, de manière à présenter un aspect mat. Après l'inscription, on lave à grande eau.

On remarquera que l'appareil présente une grande résistance électrique et pas de réactance; il peut servir de voltmètre. Deux styles semblables permettent de déterminer l'angle de phase entre une différence de potentiel et le courant qu'elle produit dans une résistance inductive. On met, à la suite de cette dernière, un conducteur sans réactance parcouru par le même courant; on dérive les deux styles et le tambour sur ces deux conducteurs et l'on obtient des traces correspondant aux maxima de la différence de potentiel et du courant.

Phasemètre Dobrowolsky. — Deux bobines disposées à angle droit sont traversées par des courants décalés d'un angle φ, tels que

$$i_1 = I_1 \sin at$$
$$i_2 = I_2 \sin (at - \varphi).$$

A l'intérieur des bobines, se trouve un disque de fer, pivotant entre pointes et qu'un ressort spiral maintient dans une position de repos. Un index porté par le disque indique sur un cadran la posi-

tion que l'action électromagnétique donne au disque. Pour trouver le couple qui sollicite ce dernier, considérons les forces électromotrices d'induction que les courants i_1 et i_2 y engendrent.

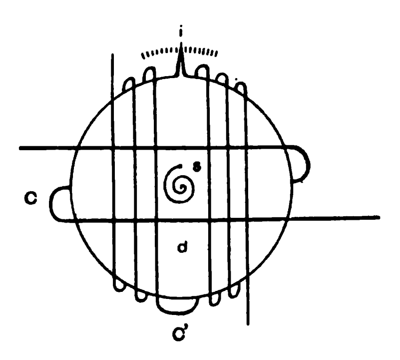


Fig. 153.

En appelant $\mathfrak{M}_1$ le coefficient d'induction mutuelle entre la bobine 1 et le disque, on a, dans le plan de 1, une force électromotrice

$$e'_1 = -\mathfrak{M}_1 \frac{di_1}{dt} = -a\,\mathfrak{M}_1\,I_1 \cos at.$$

Dans le plan de 2,

$$e'_2 = -\mathfrak{M}_2 \frac{di_2}{dt} = -a\,\mathfrak{M}_2\,I_2 \cos(at - \varphi).$$

Si r_1 et r_2 sont les résistances moyennes opposées à ces forces électromotrices, les courants sont

$$i'_1 = -\frac{a\mathfrak{M}_1 I_1}{r_1} \cos at = \frac{a\mathfrak{M}_1 I_1}{r_1} \sin\left(at - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$i'_2 = -\frac{a\mathfrak{M}_2 I_2}{r_2} \cos(at - \varphi) = \frac{a\mathfrak{M}_2 I_2}{r_2} \sin\left(at - \varphi - \frac{\pi}{2}\right).$$

Le courant i_1 ne réagit pas sur i'_1 qui est dans son plan ; mais il exerce sur i'_2 un couple moyen proportionnel au produit moyen de i_1 et i'_2, soit

$$K\,I_1 \frac{a\mathfrak{M}_2 I_2}{2 r_2} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = -K\,I_1 \frac{I_2\,a\mathfrak{M}_2}{2 r_2} \sin\varphi.$$

De même l'action de i_2 est nulle sur i'_2, mais sur i'_1 s'exerce un couple moyen

$$\frac{K' I_2 a \mathfrak{M}_1 I_1}{2 r_1} \cos\left(-\varphi + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{K' I_2 a \mathfrak{M}_1 I_1}{2 r_1} \sin\varphi.$$

On voit donc que le couple déviant résultant et, par suite, la déviation du disque sont proportionnels à $\frac{1}{2} I_1 I_2 \sin\varphi$.

Le dispositif est spécialement approprié à la détermination de la composante déwattée du courant d'un alternateur. Dans ce but, les bobines 1 et 2 sont l'une parcourue par le courant $\frac{I_1}{\sqrt{2}}$ de la machine, l'autre mise en dérivation avec une grande résistance sans self-induction sur les bornes de celle-ci. Le courant dérivé $\frac{I_2}{\sqrt{2}}$ étant proportionnel à la tension efficace de la machine, on a, si φ est le décalage de cette tension sur le courant débité par l'alternateur et α l'angle de déviation du disque,

$$\frac{I_1}{\sqrt{2}} \sin\varphi = k\alpha.$$

On peut graduer empiriquement l'instrument pour un voltage et une fréquence déterminés. Si on mesure en même temps $\frac{I_1}{\sqrt{2}}$ avec un ampèremètre, on peut déduire $\sin\varphi$ des deux lectures.

Phasemètre Brüger (1). — M. Brüger a imaginé une autre combinaison pour mesurer le décalage d'un courant par rapport à une différence de potentiel.

Le courant

$$i_1 = I_1 \sin(at - \varphi)$$

produit un flux

$$\mathfrak{N} = \mathfrak{N}_0 \sin(at - \varphi)$$

en passant dans les deux bobines co-axiales A et B entre lesquelles deux bobines C et D, calées à angle droit, pivotent sur pointes; un index repère la position de cet équipage mobile.

---

(1) FONTAINE, *Bull. de l'Ass. des Ing. Électr. sortis de l'Institut Montefiore*; 1900, p. 51.

La bobine C est mise en série avec une grande résistance non inductive et le tout est dérivé sur la différence de potentiel, de sorte que le courant dans cette bobine est

$$i_2 = I_2 \sin at.$$

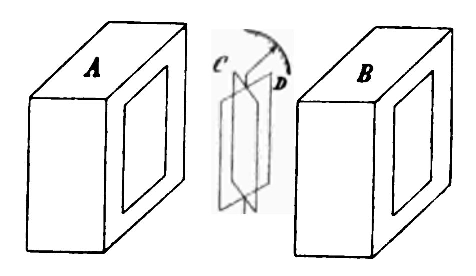


Fig. 154.

La bobine D est traversée par un courant i_3 en retard de 90° sur la différence de potentiel et dont la valeur maxima est I_2 :

$$i_3 = I_2 \sin\left(at - \frac{\pi}{2}\right).$$

Si α est l'angle de C avec l'axe des bobines A B, on a, pour le flux qui traverse C à l'instant t,

$$\mathfrak{M}' = \mathfrak{M}_0 \sin(at - \varphi) \sin \alpha.$$

Le couple moyen dû à la réaction de $\mathfrak{M}'$ sur i_2 est proportionnel à

$$\frac{\mathfrak{M}_0 I_2}{2} \sin \alpha \cos \varphi.$$

De même le flux à travers D étant

$$\mathfrak{M}'' = \mathfrak{M}_0 \sin(at - \varphi) \cos \alpha,$$

le couple moyen sollicitant D est proportionnel à

$$\frac{\mathfrak{M}_0 I_2}{2} \cos \alpha \sin \varphi.$$

En réglant les surfaces des spires et leur nombre de manière à obtenir des coefficients de proportionnalité égaux, on a, lorsque

l'équipage mobile est en équilibre,

$$\sin \alpha \cos \varphi = \cos \alpha \sin \varphi;$$

d'où

$$\alpha = \varphi.$$

L'angle de décalage se lit ainsi directement sur le cadran gradué.

Chapitre XVIII.

MESURE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION.

Coefficients de self-induction. — Le coefficient de self-induction $\mathcal{L}$ d'un circuit de résistance r, dans lequel agit une force électromotrice e, est défini par l'équation

$$i = \frac{e - d\frac{\mathcal{L}i}{dt}}{r} = \frac{e - \frac{d\mathcal{N}}{dt}}{r},$$

$\mathcal{N}$ étant le flux dû au courant qui traverse le circuit.

Dans le cas où le circuit est dépourvu de fer, le facteur $\mathcal{L}$ est constant et l'expression de la force électromotrice de self-induction peut être mise sous la forme

$$-\mathcal{L}\frac{di}{dt}.$$

Si, au contraire, on considère un électro-aimant, le coefficient d'induction est variable et deux définitions peuvent être adoptées.

Quelques électriciens conservent, dans ce cas, à l'expression de la force électromotrice de self-induction la forme précédente et posent

$$e' = -\mathcal{L}_1\frac{di}{dt},$$

d'où

$$\mathfrak{L}_1 = \frac{d\mathcal{N}}{di};$$

d'autres, plus nombreux, adoptent la forme

$$e' = -\frac{d(\mathfrak{L}_2 i)}{dt},$$

d'où

$$\mathfrak{L}_2 = \frac{\mathcal{N}}{i}.$$

La seconde définition a l'avantage de rendre le coefficient de self-induction proportionnel au coefficient de perméabilité μ, car dans le cas d'un circuit magnétique fermé, sans perte de flux,

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \frac{\mathcal{N}}{n s \times 4 \pi n_1 i},$$

si l'enroulement magnétisant comporte en tout n spires et n_1 spires par unité de longueur; d'où

$$\mathfrak{L}_2 = 4 \pi n_1 n s \mu. \qquad (^1)$$

Toutes les méthodes qui permettent de mesurer la perméabilité magnétique du circuit conduisent, par conséquent, à la connaissance du coefficient $\mathfrak{L}_2$.

C'est pour cette raison que nous adoptons la deuxième définition.

Pour éviter toute confusion, M. Blondel a proposé de réserver au coefficient $\mathfrak{L}_1$ le nom de *coefficient de réaction propre*.

On peut représenter graphiquement les deux coefficients en traçant la courbe empirique $\mathcal{N} = f(i)$ de l'électro-aimant. Pour une valeur donnée de i, le coefficient $\mathfrak{L}_1$ est le coefficient angulaire de la tangente au point correspondant de la courbe, tandis que $\mathfrak{L}_2$ est le coefficient angulaire de la droite qui joint ce point à l'origine des coordonnées.

On a d'ailleurs, entre les deux valeurs $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$, la relation

$$\mathfrak{L}_1 \, di = d(\mathfrak{L}_2 i) = \mathfrak{L}_2 \, di + i \, d\mathfrak{L}_2;$$

d'où

$$\mathfrak{L}_1 = \mathfrak{L}_2 + i \frac{d\mathfrak{L}_2}{di}.$$

---

[1] Eric GERARD, *Leçons sur l'Électricité*; t. I, chap. XVI.

Il résulte de ce qui précède que le coefficient de self-induction d'un électro-aimant est une quantité essentiellement variable, qu'il convient de déterminer pour les valeurs du courant qui traverse normalement l'électro-aimant. Ces déterminations peuvent se faire aisément, si la forme de ce dernier se prête à la mesure de la perméabilité du noyau, par l'une des méthodes qui seront exposées dans le chapitre relatif à la mesure des perméabilités.

Dans le cas contraire, on peut déterminer $\mathcal{L}$ en mesurant le flux d'électricité que transporte l'extra-courant de la bobine, soit par la méthode balistique, soit par une méthode de zéro en neutralisant l'extra-courant par celui d'une bobine étalon ou par la décharge d'un condensateur. On n'obtient toutefois par ce moyen que la différence entre le flux magnétique temporaire $\mathcal{N}$ et le flux rémanent $\mathcal{N}'$. On a, en effet, pour l'expression du flux électrique, en appelant r la résistance du circuit,

$$q = \frac{\mathcal{N} - \mathcal{N}'}{r} = \frac{(\mathcal{L}i) - (\mathcal{L}i)'}{r}.$$

D'un autre côté, il est difficile, dans les méthodes basées sur la mesure des extra-courants, d'adopter les courants normaux utilisés par les électro-aimants, sauf pour les petits appareils employés en télégraphie et en téléphonie. Dans le cas d'électro-aimants industriels, les praticiens emploient, par extension, la méthode de Joubert, décrite ci-après, qui donne une idée grossière, mais généralement suffisante, de la self-induction, surtout si l'induction est inférieure à 5 000 gauss.

M. Blondel a proposé de faire passer, dans les électro-aimants industriels, un courant rendu variable par le moyen d'un rhéostat et d'enregistrer, par un oscillographe servant de voltmètre, la différence de potentiel e aux bornes de l'électro-aimant, pendant qu'on enregistre le courant i à l'aide d'un oscillographe utilisé comme ampèremètre.

On voit par l'équation

$$e - ir = \frac{d\,(\mathcal{L}i)}{dt},$$

que si l'on déduit de la courbe des e des ordonnées égales à ir, on obtient les ordonnées du diagramme représentant les variations de $\frac{d\,(\mathcal{L}i)}{dt}$ par rapport au temps. L'intégration de ce diagramme donne les valeurs de $\mathcal{L}i$ et, par suite, celles de $\mathcal{L}$.

Nous indiquerons dans ce qui suit les méthodes de mesure les plus employées pour les bobines dépourvues de fer, dont le coefficient de self-induction peut se déterminer d'une manière très précise à l'aide de courants faibles. Par extension, ces méthodes sont employées avec plus ou moins d'exactitude pour les électro-aimants.

Méthode directe pour comparer le coefficient de self-induction d'une bobine à celui d'une bobine étalon. Emploi du commutateur de MM. Ayrton et Perry. — Nous avons décrit précédemment l'étalon de self-induction de MM. Ayrton et Perry.

Cet appareil permet de déterminer de la manière la plus rapide le coefficient de self-induction d'une bobine. Pour cela, il suffit de former un pont au moyen de deux branches non inductives b, d,

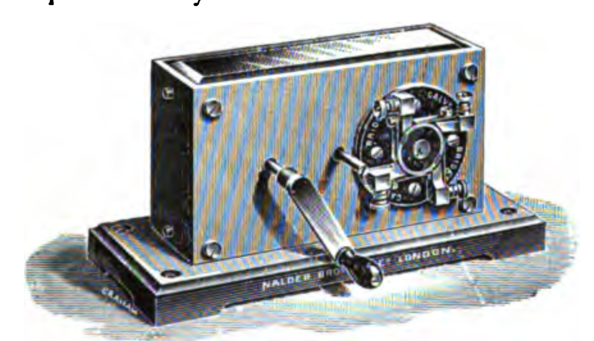


Fig. 155.

de la bobine à étalonner c et de l'étalon a. On règle l'équilibre du galvanomètre pour le régime permanent en s'aidant d'une résistance à curseur, puis, en ouvrant et en fermant successivement la clef de la pile, on modifie le calage de la bobine mobile de l'étalon, jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro pendant le régime variable. On a alors la proportion

$$\frac{a}{c} = \frac{b}{d} = \frac{\mathcal{L}_a}{\mathcal{L}_c}.$$

En effet, la condition d'équilibre dans le régime permanent donne, par l'application de la seconde loi de Kirchhoff au circuit $a\,c\,g$, la relation suivante entre les courants permanents dans les branches a et c du pont

$$a\,I_a = c\,I_c.$$

En appliquant cette loi au même circuit pendant la période variable, on a

$$a\,i_a + g\,i_g - c\,i_c = -\mathfrak{L}_a\frac{di_a}{dt} - \mathfrak{L}_g\frac{di_g}{dt} + \mathfrak{L}_c\frac{di_c}{dt}.$$

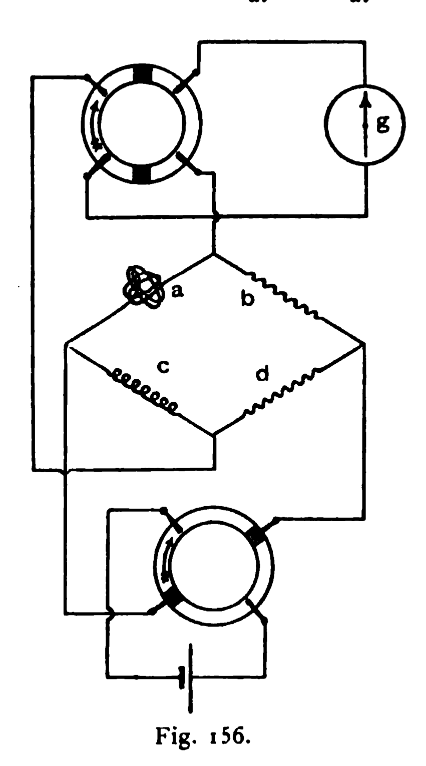


Fig. 156.

En intégrant cette équation, après avoir multiplié ses termes par dt, il vient

$$aq_a + g\,q_g - cq_c = -\mathfrak{L}_a\,I_a - \mathfrak{L}_g\,I_g + \mathfrak{L}_c\,I_c.$$

Si l'équilibre du galvanomètre est obtenu dans les deux régimes,

$$q_g = o$$

et

$$I_g = o;$$

de plus, la seconde loi de Kirchhoff, appliquée au circuit $a + b + d + c$, conduit à la relation

$$aq_a + bq_b - cq_c - dq_d = -\mathfrak{L}_a\,I_a + \mathfrak{L}_c\,I_c.$$

Lorsque $q_g = o$, $q_a = q_b$ et $q_c = q_d$; par suite

$$(a + b)\, q_a - (c + d)\, q_c = - \mathfrak{L}_a\, I_a + \mathfrak{L}_c\, I_c = aq_a - cq_c.$$

On tire de là

$$bq_a = dq_c,$$

d'où, puisque $ad = bc$, $aq_a = cq_c$ et $\mathfrak{L}_a\, I_a = \mathfrak{L}_c\, I_c$.

On a donc enfin

$$\frac{\mathfrak{L}_a}{\mathfrak{L}_c} = \frac{I_c}{I_a} = \frac{a}{c} = \frac{b}{d}.$$

MM. Ayrton et Perry ont imaginé un commutateur permettant d'accroître considérablement la sensibilité de cette méthode, en accumulant, sur le galvanomètre, les effets des impulsions dues à des fermetures et à des ouvertures répétées du circuit de la pile, fig. 155 et 156. Dans ce but, les communications du pont avec le galvanomètre et la pile sont établies à l'aide de frotteurs appuyant sur deux disques mobiles composés de segments annulaires en cuivre. Les mouvements des disques sont solidaires et ont pour effet d'ouvrir et de fermer alternativement le circuit de la pile, tandis que le galvanomètre est successivement raccordé au pont et mis en court-circuit. Les raccordements du galvanomètre au pont correspondent aux périodes variables d'ouverture et de fermeture et les connexions sont interverties par le jeu du commutateur, de telle sorte que les courants instantanés traversent le cadre galvanométrique dans le même sens. Grâce à cette méthode cumulative, un léger défaut d'équilibre s'accuse par une déviation sensible du galvanomètre.

La méthode de comparaison précédente peut encore être employée avec un étalon de self-induction invariable, à la suite duquel on ajoute des résistances réglables, mais alors il faut procéder à de longs tâtonnements pour rechercher les valeurs de b et d qui satisfont à la fois à la condition

$$\frac{b}{d} = \frac{a}{c}$$

du régime permanent et à la condition

$$\frac{b}{d} = \frac{\mathfrak{L}_a}{\mathfrak{L}_c}$$

du régime variable.

Pour arriver à assurer l'équilibre du galvanomètre dans le régime permanent, il est nécessaire, comme dans plusieurs des méthodes suivantes, d'intercaler un rhéostat à curseur dans une branche du pont, afin de pouvoir en graduer exactement la résistance.

On est parfois obligé d'introduire dans deux des branches du pont, telles que a et b, des résistances additionnelles pour changer le rapport $\frac{a}{c}$. Il faut, dans ce cas, procéder à nouveau au réglage dans le régime permanent. Pour éviter ces tâtonnements, on peut faire $c = d$. Il suffit alors d'ajouter à a et b des résistances égales; l'équilibre permanent subsiste, quel que soit le rapport $\frac{a}{c}$.

On peut discuter la méthode en raisonnant comme dans le cas du pont de Wheatstone. Si l'on calcule la valeur de b la plus favorable au point de vue de la sensibilité dans la période variable, on trouve, en appelant ρ la résistance de la pile et n le rapport $\frac{b}{d}$,

$$b = \sqrt{\frac{g a n [a + \rho (n + 1)]}{g n + a (n + 1)}}. \quad \text{(M. Gray)}$$

Il ne faut pas s'attendre à obtenir, dans des mesures de ce genre, la même précision que celle qu'on peut atteindre dans la détermination des résistances, parce que les bobines du pont ont, en général, une self-induction et une capacité qui ne sont pas négligeables.

Méthodes indirectes. Méthode de Lord Rayleigh pour mesurer un coefficient de self-induction en fonction d'une résistance. — La bobine d, dont le coefficient de self-induction est $\mathfrak{L}$, est intercalée dans la quatrième branche d'un pont de Wheatstone monté à l'aide d'un galvanomètre balistique et de trois séries de conducteurs sans réactance (fig. 157). On règle d'abord les côtés pour le régime permanent, à la manière ordinaire. On ferme ensuite la diagonale du galvanomètre avant celle de la pile; la réaction de self-induction de la bobine d amène une élongation α. Lors de l'ouverture du circuit de la pile, on obtient une élongation égale et de sens contraire. En désignant par I_d le courant de régime dans la branche

d, la quantité d'électricité que transporte l'extra-courant d'ouverture est

$$Q = \frac{\mathfrak{L}\, I_d}{d + b + \frac{g(a+c)}{g+a+c}}.$$

La fraction de ce flux électrique dérivée dans le galvanomètre est

$$q = \frac{\mathfrak{L}\, I_d}{d + b + \frac{g(a+c)}{g+a+c}} \frac{a+c}{g+a+c} = \frac{\alpha}{K},$$

K représentant la constante balistique du galvanomètre.

On détruit ensuite l'équilibre permanent du pont en ajoutant à d une petite résistance r, ce qui produit, dans le galvanomètre, une déviation permanente δ.

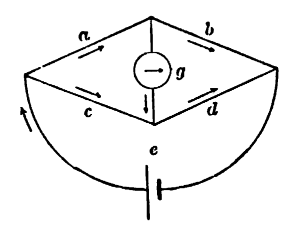


Fig. 157.

Le courant qui traverse le galvanomètre est alors le même que si une force électromotrice égale à $r\, I'_d$ agissait dans la branche d, la diagonale de la pile étant interrompue.

On a donc

$$i = \frac{r\, I'_d}{d + b + \frac{(a+c)g}{a+c+g}} \frac{a+c}{a+c+g} = \frac{\delta}{k},$$

k étant la constante permanente du galvanomètre.

De la combinaison des équations précédentes, on déduit

$$\mathfrak{L} = r \frac{I'_d}{I_d} \frac{k}{K} \frac{\alpha}{\delta}.$$

Lorsqu'on emploie un galvanomètre sensible, la résistance r à

ajouter à d est très faible, de sorte que les courants I_d et I'_d ne diffèrent que d'une quantité négligeable et que leur rapport est sensiblement égal à l'unité; la formule se réduit alors à

$$\mathfrak{L} = r \frac{k}{K} \frac{\alpha}{\delta}.$$

Si T_o est la période d'oscillation du galvanomètre non amorti, on a

$$\mathfrak{L} = r \frac{T_0}{\pi} \frac{\alpha}{\delta}.$$

On rend la méthode plus sensible en utilisant, comme l'a suggéré M. Ledeboer, le commutateur de MM. Ayrton et Perry, qu'on actionne à l'aide d'un moteur dont on peut déterminer le nombre de révolutions par seconde. On obtient, dans ce cas, pour le régime variable, une déviation permanente δ' au lieu de l'élongation α. Cette déviation peut être considérée comme due à une force électromotrice $n\,\mathfrak{L}\,I_d$, si n désigne le nombre de fois que le courant est interrompu et rétabli par seconde. On a donc

$$\frac{n\,\mathfrak{L}\,I_d}{r\,I'_d} = \frac{\delta'}{\delta},$$

ou, si I'_d est sensiblement égal à I_d,

$$\mathfrak{L} = r \frac{\delta'}{\delta} \frac{1}{n}. \qquad (1)$$

Au point de vue de la sensibilité de la méthode, on remarquera que tout se passe comme si l'on avait accru la résistance de la branche d d'une quantité $\mathfrak{L}n$. On calculera donc l'erreur limite sur $\mathfrak{L}n$ de la même manière que l'on calcule, dans le cas du pont ordinaire, l'erreur qu'on peut commettre sur d et l'on adoptera les conditions les plus favorables indiquées à propos de la mesure des résistances. Il est facile de voir, par l'équation (1), que l'erreur absolue sur $\mathfrak{L}$ est d'autant plus faible que n est plus grand. Il ne faut pas toutefois que la vitesse du commutateur devienne telle que le régime variable soit inachevé au moment de la commutation. On s'en assure en variant légèrement n : il faut que la valeur trouvée pour $\frac{\delta'}{n}$ ne change pas.

Méthode de M. Joubert. — Lorsqu'une bobine de résistance r et de self-induction constante $\mathfrak{L}$ est parcourue par un courant

rigoureusement sinusoïdal de fréquence n, son impédance est égale à

$$\sqrt{r^2 + 4\pi^2 n^2 \mathfrak{L}^2}.$$

Si l'on mesure l'intensité I_{eff} du courant à l'aide d'un électrodynamomètre et la différence du potentiel V_{eff} aux bornes de la bobine par le moyen d'un voltmètre spécial ou d'un électromètre, on a

$$\sqrt{r^2 + 4\pi^2 n^2 \mathfrak{L}^2} = \frac{V_{eff}}{I_{eff}},$$

d'où

$$\mathfrak{L} = \frac{1}{2\pi n}\left(\frac{V^2_{eff}}{I^2_{eff}} - r^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

On peut aussi mettre, à la suite de la bobine essayée, une résistance connue R sans réactance et déterminer la différence de potentiel V'_{eff} aux bornes de celle-ci. On a alors

$$\frac{\sqrt{r^2 + 4\pi^2 n^2 \mathfrak{L}^2}}{R} = \frac{V_{eff}}{V'_{eff}},$$

d'où

$$\mathfrak{L} = \frac{1}{2\pi n}\left(R^2 \frac{V^2_{eff}}{V'^2_{eff}} - r^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Cette dernière disposition, comme la méthode de Lord Rayleigh, ramène la mesure de la self-induction à la comparaison avec une résistance.

Le conducteur sans réactance peut être constitué par un bain salin, les électrodes étant en même métal que celui du sel, ou par des lampes à incandescence. On obtient le maximum de précision et l'on atténue les erreurs de graduation en réglant le conducteur sans réactance de manière à obtenir les mêmes différences de potentiel, $V_{eff} = V'_{eff}$, et en cherchant à réaliser les déviations les plus grandes possibles. Mais avec les grandes impédances, ces conditions entraînent à des résistances sans réactance considérables.

La méthode de M. Joubert est la plus employée par les praticiens pour déterminer la self-induction des grands électro-aimants. On l'applique à ceux-ci en utilisant des alternateurs dont la courbe de

courant se rapproche autant que possible de la forme sinusoïdale. Il va sans dire que, dans ce cas, le résultat ne donne qu'une valeur moyenne et assez grossière de la self-induction qui, pour un électro-aimant traversé par un courant périodique de grande intensité, est essentiellement variable. On adopte, pour effectuer la mesure, des courants dont l'intensité efficace est voisine de celle des courants de régime que l'électro-aimant doit supporter.

Comparaison d'une self-induction et d'une capacité. Méthodes de MM. Vaschy et de la Touanne, de M. Sumpner et de M. Kempe. — L'annulation des effets de la self-induction par ceux d'une capacité a conduit aux méthodes les plus employées dans les laboratoires et les plus commodes pour la mesure de la self-induction des bobines sans fer et des petits électro-aimants. Le principe de ces méthodes est le suivant. Un condensateur de capacité c, shunté par une résistance r', se comporte dans un circuit parcouru par des courants variables comme une bobine de résistance r' et de self-induction $-cr'^2$.

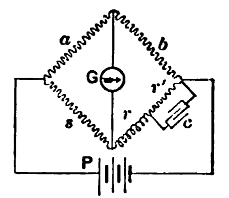


Fig. 158.

Un pont de Wheatstone comprend trois branches sans réactance a, b, s. Dans la quatrième branche, on dispose la bobine r, dont on cherche la self-induction $\mathfrak{L}$, en série avec une résistance R sur une partie de laquelle est dérivée une capacité c. On commence par équilibrer les côtés du pont pour le régime permanent. On cherche ensuite l'équilibre dans le régime variable, en modifiant les points de raccordement du condensateur avec le conducteur R. Soit r' la résistance comprise entre les armatures lorsque le galvanomètre reste au repos, tant à l'ouverture qu'à la fermeture du circuit de la pile. On a alors

$$\mathfrak{L} = c\,r'^2\,;$$

c doit être exprimé en farads et r' en ohms pour obtenir $\mathfrak{L}$ en henrys.

En effet, désignons par v la différence de potentiel instantanée aux bornes du condensateur; le courant dans la dérivation de ce dernier est à un moment quelconque

$$i_1 = \frac{dq}{dt} = \frac{c\,dv}{dt}.$$

Si i est le courant dans la résistance r au même instant, le courant dans r' est

$$i_2 = i - i_1 = i - \frac{c\,dv}{dt}.$$

La différence de potentiel instantanée $v = i_2\,r' = ir' - cr'\,\frac{dv}{dt}$.

On voit que tout se passe comme si, le condensateur étant supprimé, la résistance r' était traversée par le courant i et contenait une force électromotrice $cr'\,\frac{dv}{dt}$ de même sens que v.

La différence de potentiel aux extrémités des résistances $r + \mathrm{R}$ est

$$(r + \mathrm{R} - r')\,i + \frac{\mathfrak{L}di}{dt} + ir' - cr'\,\frac{dv}{dt};$$

on a simplement $i\,(r + \mathrm{R})$ si

$$\mathfrak{L}\,di = cr'\,dv$$

ou, en désignant par I le courant et V la différence de potentiel à la fin du régime variable, si

$$\mathfrak{L}\,\mathrm{I} = cr'\,\mathrm{V}.$$

Mais

$$\mathrm{V} = \mathrm{I}\,r',$$

de sorte qu'alors

$$\mathfrak{L} = cr'^2.$$

La méthode précédente, proposée par MM. Vaschy et de la Touanne, a été modifiée par eux comme suit, pour le cas où il n'est pas possible de régler les résistances de manière à

obtenir l'équilibre dans le régime variable. On règle l'équilibre permanent, puis on observe l'élongation δ due à l'extra-courant de la bobine seule, le condensateur étant enlevé. On répète l'expérience avec le condensateur mis en dérivation sur une fraction r' de la résistance du côté du pont dans lequel est intercalée la bobine essayée; on obtient une élongation δ'. Il est facile de voir que

$$\frac{\mathfrak{L}}{c\,r'^2} = \frac{\delta}{\delta - \delta'}.$$

Dans la méthode proposée par M. Sumpner, le condensateur est dérivé sur une résistance R prise dans le côté du pont conjugué par

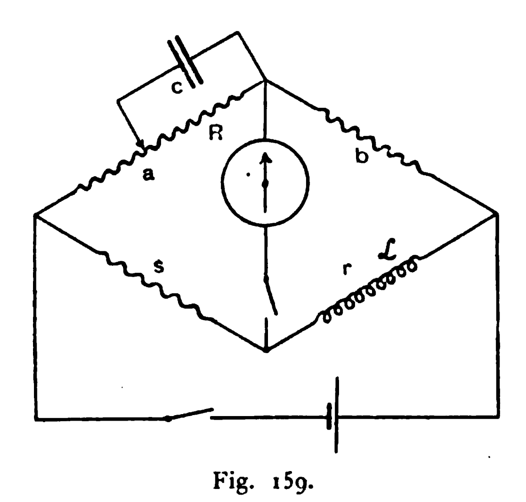


Fig. 159.

rapport à la bobine que l'on mesure, fig. 159. Lorsque l'équilibre est établi dans le régime permanent et dans le régime variable, on a

$$\mathfrak{L}a = r\,c\,\mathrm{R}^2,$$

d'où

$$\mathfrak{L} = \frac{r}{a}\,c\,\mathrm{R}^2.$$

Ce procédé permet, comme on le voit, de mesurer des self-inductions très différentes avec un condensateur de capacité donnée.

Les méthodes précédentes donnent souvent lieu à quelque

incertitude avec les électro-aimants, parce que l'aimantation et la désaimantation du noyau occasionnent des oscillations du galvanomètre autour de la position d'équilibre. M. Kempe obvie à cet inconvénient en faisant deux expériences distinctes. A cet effet, on règle l'équilibre dans le régime permanent avec l'électro-aimant de résistance r, fig. 160 ; lors de l'ouverture ou de la fermeture de la clef de la pile, le galvanomètre est traversé par un extra-courant déterminant une élongation δ.

On substitue ensuite à l'électro-aimant le condensateur dérivé sur une résistance R et l'on remplace r_1 par une résistance r_2 telle que

$$r_2 + R = r_1 + r.$$

Si l'élongation δ' due à la décharge du condensateur est voisine de δ, on a

$$\frac{\mathcal{L}}{c R^2} = \frac{\delta}{\delta'}.$$

Dans les méthodes de zéro de MM. Vaschy et de la Touanne et de M. Sumpner, l'équilibre dans le régime permanent est réalisé au moyen d'une résistance à curseur, insérée dans l'une des branches du pont. Si l'on ne peut régler la résistance dérivée sur le condensateur de manière à obtenir l'annulation de l'élongation dans le galvanomètre, on procède par interpolation.

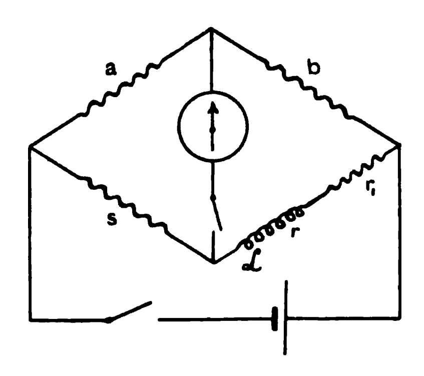


Fig. 160.

L'adjonction du commutateur de MM. Ayrton et Perry à ces

dispositifs accroit notablement la sensibilité, puisque cet appareil remplace les élongations balistiques par des déviations permanentes.

Si l'on mesure des inductances faibles, il faut avoir égard à la capacité des bobines, qui peut apporter des erreurs sensibles.

Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle avec un coefficient de self-induction. Méthode de Maxwell. — Considérons une bobine d'induction dont un des circuits possède une résistance r et une self-induction $\mathfrak{L}$, déterminées au préalable par l'une des méthodes précédentes. On forme un pont de Wheatstone à l'aide de résistances a, b, c, r, qu'on règle de manière à obtenir l'équilibre permanent, fig. 161. On cherche ensuite à établir l'équilibre dans le régime variable en opposant le flux d'induction mutuelle de la bobine au flux de self-induction du premier circuit. En appelant $\mathfrak{M}$ l'inductance mutuelle des deux enroulements et I le courant per-

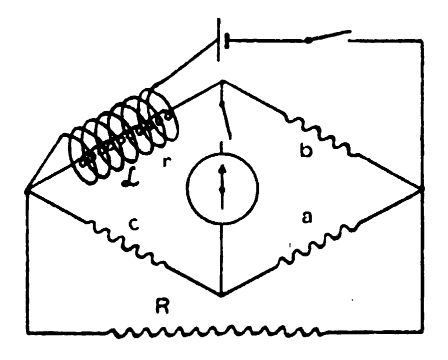


Fig. 161.

manent qui parcourt la bobine inductrice, le flux d'électricité dû à l'induction mutuelle est égal au rapport de $\mathfrak{M}I$ à la résistance du circuit dans lequel est inséré l'enroulement r. Le flux d'électricité dû à la self-induction est égal au quotient de $\mathfrak{L}I'$ par la même résistance, I′ désignant le courant permanent qui traverse r.

Lorsque le galvanomètre n'accuse plus aucune élongation dans le régime variable, on a

$$\mathfrak{M}\, I = \mathfrak{L}\, I',$$

d'où

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{L}\frac{I'}{I}. \qquad (1)$$

Mais

$$I' = I\,\frac{a+c}{a+c+r+b} = I\,\frac{c}{c+r},$$

par suite

$$\mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{L}}{\left(1+\frac{r}{c}\right)}.$$

Le réglage de l'équilibre dans le régime variable dérègle le régime permanent ; cette méthode exige donc des tâtonnements assez longs pour arriver à satisfaire aux deux conditions.

Pour éviter ces tâtonnements, on dérive sur la diagonale de la pile une résistance R qui ne trouble en rien l'équilibre dans le régime permanent et l'on gradue cette résistance jusqu'à l'obtention de l'équilibre dans le régime variable, fig. 161.

On a alors

$$\frac{I'}{I} = \frac{\dfrac{R(a+c)}{R+a+c}}{\dfrac{R(a+c)}{R+a+c}+r+b}.$$

Remplaçant dans (1) et introduisant la condition $ar = bc$, on trouve

$$\mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{L}}{\left(1+\dfrac{rR+bc+cr}{Rc}\right)}.$$

Ces deux dispositifs entraînent la condition $\mathfrak{L} > \mathfrak{M}$, attendu que $I > I'$. M. Brillouin a suggéré de mettre l'enroulement inducteur de la bobine dans la branche R au lieu de le disposer dans la diagonale de la pile. On a alors, en appelant R' la résistance totale du shunt comprenant cet enroulement,

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{L}\,\frac{R'}{r+b}.$$

Ces méthodes permettent l'emploi du commutateur rotatif de MM. Ayrton et Perry pour accroître la sensibilité.

Comparaison d'un coefficient d'induction mutuelle et d'une capacité. Méthodes de comparaison et de réduction à zéro de MM. Vaschy et de la Touanne. — Le flux d'électricité $\frac{\mathfrak{M} I}{\rho}$, produit par un courant inducteur I dans un circuit de résistance ρ, peut être mesuré par l'élongation α d'un galvanomètre balistique:

$$\frac{\mathfrak{M} I}{\rho} = \frac{\alpha}{K}.$$

Si l'on charge un condensateur étalon de capacité c, en reliant ses armatures aux extrémités d'une résistance ρ' parcourue par le même courant I, la décharge dans le galvanomètre occasionne une élongation α' telle que

$$c I \rho' = \frac{\alpha'}{K}.$$

On déduit de là

$$\mathfrak{M} = c \rho \rho' \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Il est facile de voir que cette mesure est d'autant plus précise que α et α' sont plus grands et plus voisins.

MM. Vaschy et de la Touanne ont basé sur ce principe une méthode de zéro en utilisant la disposition qu'indique la fig. 162 et qui permet d'équilibrer les effets des deux flux élec-

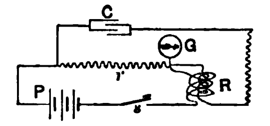


Fig. 162

triques sur le galvanomètre. Le condensateur c est dérivé sur une boîte de résistance r, mise en circuit avec une pile et la bobine primaire. Soit R la résistance totale de la bobine secondaire et d'une boîte de résistance en série avec elle.

En appelant e la force électromotrice de la pile et r' les résistances du circuit de la pile autres que r, on a, pour la valeur du courant permanent,

$$I = \frac{e}{r + r'}. \qquad (1)$$

Désignons par $\mathcal{L}$ la self-induction de la bobine induite, par $\mathcal{L}_g$ celle du galvanomètre et par i, i', i'' les valeurs des courants qui, à un moment quelconque de la période variable, circulent dans la bobine inductrice, dans la bobine induite et dans le galvanomètre.

La seconde loi de Kirchhoff, appliquée à cet instant au circuit de la bobine induite et du galvanomètre, donne

$$R\,i' + g\,i'' = -\mathcal{L}\frac{di'}{dt} - \mathfrak{M}\frac{di}{dt} - \mathcal{L}_g\frac{di''}{dt}.$$

Si l'on multiplie les deux membres par dt et si l'on intègre entre les limites de la période variable, en remarquant que les courants i' et i'' sont nuls à ces époques et que i varie de I à o, on a

$$R\,q' + g\,q'' = \mathfrak{M}\,I, \qquad (2)$$

où q' et q'' représentent les flux d'électricité correspondant aux courants i' et i''.

Or, la différence entre les flux q' et q'' constitue précisément la charge du condensateur, égale d'autre part à crI;

$$c\,r\,I = q' - q''. \qquad (3)$$

En éliminant q' entre (2) et (3), il vient

$$q'' = \frac{I\,(\mathfrak{M} - c\,R\,r)}{g + R}.$$

On voit que l'élongation du galvanomètre est nulle pour

$$\mathfrak{M} = c\,R\,r. \qquad (4)$$

Afin de déterminer les meilleures conditions de l'expérience, remplaçons I par sa valeur (1); on a

$$q'' = \frac{e\,(\mathfrak{M} - cRr)}{(r + r')\,(g + R)} = \frac{e\,(\mathfrak{M} - cRr)}{\Delta}.$$

Le numérateur est nécessairement une quantité très faible et l'on peut considérer l'élongation comme maxima pour les valeurs de r et R qui rendent le dénominateur minimum.

Égalons à zéro la dérivée de ce dénominateur par rapport à r :

$$\frac{d\Delta}{dr} = (g + R) + (r + r')\frac{dR}{dr} = 0. \qquad (5)$$

On tire d'autre part de (4)

$$R + r\frac{dR}{dr} = o. \qquad (6)$$

En éliminant $\frac{dR}{dr}$ entre les équations (5) et (6), on trouve le rapport $\frac{R}{r}$ qui procure le maximum de sensibilité :

$$\frac{R}{r} = \frac{g+R}{r+r'} = \frac{g}{r'}.$$

La méthode de réduction à zéro présente l'avantage de permettre l'emploi d'un galvanomètre très sensible. D'autre part, elle a l'inconvénient, lorsqu'on mesure les bobines d'induction à noyau de fer, de donner lieu à une inexactitude résultant de l'inégalité de durée de la décharge du condensateur et de la désaimantation du noyau. Il en résulte des oscillations du galvanomètre autour du zéro. A ce point de vue, la méthode de comparaison simple est plus précise.

MESURES MAGNÉTIQUES

Chapitre XIX.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES.

Détermination de l'intensité horizontale du champ terrestre. Méthode du magnétomètre de Gauss. — Un barreau aimanté droit est suspendu horizontalement, dans une cage fermée par une glace, à l'aide d'un fil ou d'un faisceau de fils de cocon assez long pour ne pas développer de couple de torsion appréciable, fig. 163. Un miroir est fixé sur l'axe de suspension, afin de permettre d'observer les déviations sur une échelle. On fait osciller l'aimant sans lui communiquer de mouvement pendulaire en approchant de la boîte, suivant la direction Est-Ouest passant par le centre de l'aimant, un second barreau. On détermine ainsi une déviation d'environ 3°, puis on retire le barreau auxiliaire et l'on mesure la durée de la période. Pour cela, un observateur note les passages de l'aimant et donne un signal, en prononçant le mot *top* par exemple, après chaque dizaine d'oscillations complètes, pendant qu'un second observateur lit les temps correspondants sur un chronomètre marquant le cinquième de seconde. On déduit de ces observations la durée d'une oscillation complète.

On sait que, si l'on fait osciller dans le champ magnétique terrestre, suivant l'horizontale, un barreau suspendu par un fil

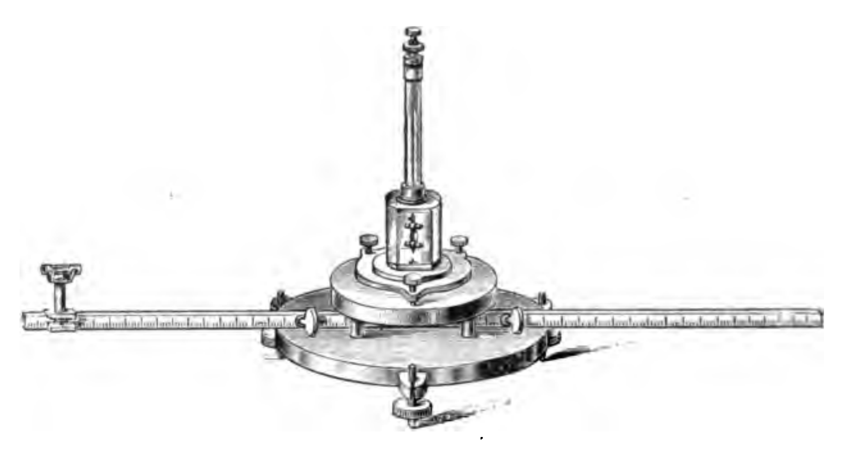


Fig. 163.

sans réaction de torsion sensible, la durée d'une oscillation complète, pour une amplitude suffisamment faible, est

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\mathcal{M}\,\mathcal{H}}},$$

K représentant le moment d'inertie du barreau, $\mathcal{M}$ son moment magnétique et $\mathcal{H}$ la composante horizontale du champ terrestre.

On tire de là

$$\mathcal{M}\,\mathcal{H} = \frac{4\pi^2 K}{t^2}. \qquad (1)$$

Le moment d'inertie de l'aimant est calculé d'après le poids et les dimensions de celui-ci.

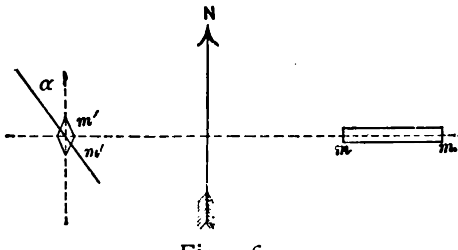


Fig. 164.

Après l'expérience d'oscillation, on effectue un essai de déviation en posant le barreau sur une règle divisée horizontale, fig. 164, normalement au méridien magnétique, et en suspendant à une certaine distance, sur le prolongement de l'axe du barreau, une aiguille aimantée de petites dimensions.

Soient $2\,l$, la distance des pôles du barreau ; $2\,l'$, celle des pôles de l'aiguille ; a, la distance du centre de l'aimant à celui de l'aiguille ; $+\,m$ et $-\,m$, les pôles de l'aimant ; $+\,m'$ et $-\,m'$, les pôles de l'aiguille.

L'aiguille mobile, sollicitée d'une part par le magnétisme terrestre, d'autre part par l'aimant, prend une position d'équilibre correspondant à un angle α entre son axe et le méridien magnétique. Vu les petites dimensions de l'aiguille, on peut admettre que les forces exercées sur ses pôles par ceux de l'aimant se réduisent à un couple.

Le couple terrestre a pour expression

$$c = \mathcal{M}'\,\mathcal{H} \sin \alpha.$$

Le couple dû au barreau est, en appelant F les forces que celui-ci développe sur les pôles de l'aiguille,

$$c' = 2\,\mathrm{F}\,l' \cos \alpha.$$

Or, en vertu de la loi de Coulomb,

$$\mathrm{F} = \frac{mm'}{(a-l)^2} - \frac{mm'}{(a+l)^2} = mm'\,\frac{4\,a\,l}{(a^2-l^2)^2};$$

par suite

$$c' = 2l'\,mm'\,\frac{4\,a\,l \cos \alpha}{(a^2-l^2)^2} = 2\,\mathcal{M}\,\mathcal{M}'\,\frac{a \cos \alpha}{(a^2-l^2)^2}.$$

La condition d'équilibre est

$$\mathcal{M}'\,\mathcal{H} \sin \alpha = 2\,\mathcal{M}\,\mathcal{M}'\,\frac{a \cos \alpha}{(a^2-l^2)^2},$$

d'où

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}\left(1-\frac{l^2}{a^2}\right)^{-2} = \frac{a^3 \operatorname{tang} \alpha}{2}.$$

Mais

$$\left(1-\frac{l^2}{a^2}\right)^{-2} = 1 + 2\,\frac{l^2}{a^2} + 3\,\frac{l^4}{a^4} + \ldots;$$

Si l est suffisamment petit, on peut négliger les puissances de $\frac{l}{a}$ supérieures à la seconde et écrire

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}\left(1 + 2\,\frac{l^2}{a^2}\right) = \frac{a^3 \operatorname{tang} \alpha}{2}. \qquad (2)$$

On ne connaît pas, en général, la distance réelle l des pôles. On peut éliminer cet élément en renouvelant l'expérience de déviation pour un nouvel écartement a' de l'aiguille.

On obtient un angle de déviation α' tel que

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}\left(1 + 2\,\frac{l^2}{a'^2}\right) = \frac{a'^3 \operatorname{tang} \alpha'}{2}, \qquad (3)$$

d'où, en soustrayant (3) de (2) après avoir multiplié (2) par a^2 et (3) par a'^2,

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}} = \frac{a^5 \operatorname{tang} \alpha - a'^5 \operatorname{tang} \alpha'}{2\,(a^2 - a'^2)}. \qquad (4)$$

Les équations (1) et (4) permettent de déterminer séparément le moment magnétique de l'aimant et l'intensité horizontale du champ magnétique terrestre.

Lorsqu'on cherche à atteindre une haute précision dans l'estimation du rapport $\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{H}}$, un grand nombre de corrections sont nécessaires.

Tout d'abord, la formule (4) montre que ce rapport est fortement influencé par une erreur commise dans la détermination de a et de a'.

Pour éliminer l'erreur provenant d'une excentricité de l'axe du magnétomètre par rapport à l'axe de suspension de l'aiguille, on répète l'expérience de déviation, en plaçant l'aimant déviant dans des positions symétriques de part et d'autre de l'aiguille déviée, et l'on prend des moyennes. Pour corriger l'erreur qui peut résulter d'une excentricité du centre magnétique de l'aimant, on retourne le barreau déviant bout pour bout dans chacune de ses positions et l'on adopte la moyenne des lectures.

Les déviations doivent être aussi grandes que possible, sans que toutefois a' devienne inférieur à $6l$. Le rapport le plus favorable de a et de a' est compris entre $\frac{4}{3}$ et $\frac{3}{2}$.

Pour estimer l'influence de la température sur le moment magnétique du barreau, on répète l'expérience de déviation après avoir placé l'aimant dans un bain chauffé à une température connue.

La correction pour la torsion des fils de suspension s'effectue comme dans le cas des galvanomètres.

Il faut avoir égard à l'altération que subit le moment du barreau par l'action du magnétisme terrestre, qui tend à accroître le moment de l'aimant lorsque, dans l'expérience d'oscillation, le barreau se déplace dans le voisinage du méridien. On peut, dans l'expérience de déviation, donner au barreau la même intensité d'aimantation que dans l'expérience d'oscillation, en le disposant dans une longue bobine traversée par un courant capable de produire un champ de même intensité que le champ terrestre. L'effet direct de ce courant sur l'aiguille mobile est compensé en plaçant une bobine semblable, exerçant un effet antagoniste, de l'autre côté de l'aiguille.

Enfin, on doit tenir compte des variations diurnes du magnétisme terrestre, indiquées dans les tables magnétiques.

Il va sans dire que les observations précises doivent se faire dans des locaux dépourvus de toute matière magnétique.

Si l'on veut comparer les valeurs de l'intensité horizontale en différents points, il suffit de répéter l'expérience d'oscillation aux points considérés; on a, en désignant par t et t' les durées d'oscillation correspondant à des intensités $\mathcal{H}$ et $\mathcal{H}'$,

$$\frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}'} = \frac{t'^2}{t^2}.$$

Inclinomètre de Weber. — La détermination de l'intensité horizontale du champ terrestre peut être faite à l'aide de l'inclinomètre de Weber. Cet appareil consiste en un cadre circulaire M N, entouré d'un grand nombre de spires de fil fin et de dimensions exactement connues. Le cadre est mobile autour d'un diamètre $o\ o'$ et des arrêts limitent sa révolution à 180°; son enroulement est relié à un galvanomètre balistique. En plaçant le cadre dans un plan vertical normal au méridien magnétique, et en le faisant tourner de 180°, la quantité d'électricité induite par le magnétisme terrestre donne la mesure de l'intensité horizontale.

Soient R la résistance du circuit en ohms, n le nombre de spires de la bobine, a la surface moyenne des spires. La variation du

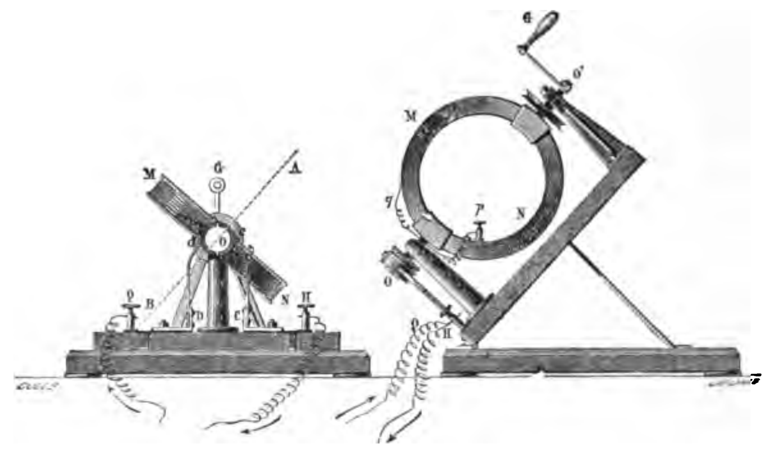


Fig. 165.

flux est $2\,\mathcal{H}\,a\,n$ et la quantité d'électricité induite q, exprimée en coulombs, est donnée par la formule

$$q \times 10^{-1} = \frac{2\,\mathcal{H}\,a\,n}{R \times 10^{8}}. \qquad (1)$$

En appelant α l'élongation du galvanomètre et K sa constante balistique, il vient

$$q = \frac{\alpha}{K},$$

d'où

$$\mathcal{H} = \frac{10^{8}\,\alpha\,R}{2\,K\,an}.$$

Il faut que la durée du mouvement du cadre soit très courte par rapport à la période d'oscillation du galvanomètre. Si celui-ci est à aimant fixe, il faut déterminer la correction pour l'amortissement. On diminue l'importance de cette correction en introduisant une grande résistance dans le circuit.

Pour éviter cette correction, on peut utiliser la méthode suivante. On insère dans le circuit de l'inclinomètre et du galvanomètre une petite bobine enroulée vers le milieu d'un long solénoïde. On fait une seconde expérience en envoyant dans ce dernier un courant de

i ampères; on y développe ainsi un flux de force magnétique représenté par

$$\mathcal{H} = 4 \pi n_1 is \times 10^{-1},$$

n_1 étant le nombre de spires par centimètre et *s* la section moyenne en cm². Si la petite bobine présente n' spires, elle est traversée pendant la période variable par un flux d'électricité

$$q' \times 10^{-1} = \frac{\alpha'}{K} \times 10^{-1} = \frac{4 \pi n_1 s n' i \times 10^{-1}}{R \times 10^9}. \qquad (2)$$

L'amortissement du galvanomètre est le même dans les deux expériences. On a donc, en comparant (1) et (2),

$$\mathcal{H} = \frac{\alpha}{\alpha'} \frac{\pi n_1 s n' i}{5 a n}. \qquad (3)$$

L'intensité *i* du courant qui traverse le solénoïde est mesurée par un ampèremètre.

Avec les galvanomètres à aimant mobile, dont l'amortissement est peu influencé par la résistance du circuit, on peut éliminer K en déchargeant dans le galvanomètre un condensateur de capacité connue, *c* microfarads, chargé à l'aide d'une pile étalon ayant une force électromotrice de *e* volts.

On a

$$q'' \times 10^{-1} = \frac{\alpha''}{K} \times 10^{-1} = c e \times 10^{-7},$$

d'où

$$\mathcal{H} = 50 \frac{R c e}{a n} \frac{\alpha}{\alpha''}. \qquad (4)$$

Si l'on prend la dérivée logarithmique des expressions (3) et (4), on voit que l'erreur relative limite commise sur $\mathcal{H}$ est la somme des erreurs commises sur les diverses quantités qui entrent dans les seconds membres. On se placera dans les conditions les plus favorables, au point de vue des lectures, en cherchant à obtenir les élongations les plus grandes et les plus voisines possible.

Mesure de l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer d'une dynamo. Méthode par induction. Méthode basée sur le phénomène de Hall. — La méthode basée sur l'induction permet de mesurer l'intensité d'un champ très resserré, tel que celui que pré-

sente l'entrefer des dynamos, car il est toujours possible d'introduire dans un champ semblable une petite bobine aplatie, reliée à un galvanomètre. On compose cette bobine de spires allongées, agglutinées par la gomme laque, comme les bobines des galvanomètres Deprez et d'Arsonval ; pour éviter l'érosion de l'isolant par le frottement, on peut enfermer la bobine entre des joues de mica. En retirant vivement la bobine, de manière à l'amener dans une position telle que le flux de force magnétique qui la traverse soit négligeable, on produit dans le circuit un déplacement d'électricité mesuré par l'élongation du galvanomètre.

Pour déterminer la constante de celui-ci, on peut se servir d'un inclinomètre intercalé dans le circuit ou du solénoïde dont il est question plus haut.

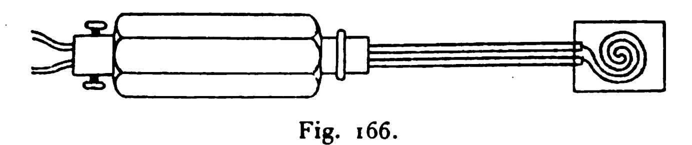


Fig. 166.

M. Leduc a indiqué l'accroissement de la résistance électrique du bismuth placé dans un champ magnétique comme un moyen de mesurer l'intensité de celui-ci [1].

Dans l'appareil construit par MM. Hartmann et Braun pour cette détermination, un fil mince de bismuth, d'une résistance d'environ 10 ohms, est contourné en double spirale, pour annuler la self-induction, et logé entre deux lamelles de mica de manière que l'épaisseur ne dépasse pas 0,5 mm. Ce fil est raccordé à deux bandes de cuivre protégées par une gaîne d'ébonite. La spirale peut être introduite dans un entrefer très exigu. On détermine rapidement sa résistance avant et après l'introduction, à l'aide d'un pont à téléphone de Kohlrausch. L'accroissement de résistance n'est pas tout à fait proportionnel à l'intensité du champ. Il faut graduer l'appareil expérimentalement ou se servir d'une courbe empirique livrée avec l'instrument par le constructeur.

---

[1] E. Van Aubel ; *Éclairage Électrique,* 1 juin 1895.

Chapitre XX.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE ET DE L'HYSTÉRÉSIS.

Généralités. — L'essai des fers, fontes et aciers employés pour la construction des dynamos et des transformateurs est d'une importance capitale. Dans la construction des inducteurs d'une dynamo, on peut, à la rigueur, corriger un défaut de perméabilité par un excès de cuivre, mais, dans les transformateurs, où toute la place libre est occupée par le cuivre, une insuffisance magnétique du noyau est sans remède.

L'analyse chimique renseigne très incomplètement sur les qualités magnétiques du fer; l'état physique joue un rôle très important. Aussi l'essai magnétique est-il nécessaire.

On ne doit pas s'attendre à une grande précision dans les mesures magnétiques, attendu que la structure dissymétrique donnée au métal par l'étirage, le laminage ou le travail des outils peut apporter des différences de 30 à 40 pour 100 dans les propriétés magnétiques suivant la direction de la force magnétisante. C'est ainsi que la perte par hystérésis mesurée en soumettant une éprouvette à un champ magnétique alternatif est inférieure à celle qu'on obtient en faisant tourner l'éprouvette dans un champ constant. La première est appelée *hystérésis linéaire* ou *alternative*; c'est celle des noyaux

des transformateurs. La seconde, désignée sous le nom d'*hystérésis tournante*, se trouve dans les induits des dynamos. Il est indispensable de recuire les échantillons essayés si l'on veut arriver à des résultats comparables.

Pour les raisons qui précèdent, on ne s'étonnera pas de trouver des différences de 30 à 50 pour 100 dans les résultats des essais effectués par diverses méthodes sur une même qualité de fer.

Pour permettre d'éliminer les erreurs systématiques dans les mesures de contrôle, on aura soin de mentionner la méthode d'essai employée, en indiquant tous les détails propres à permettre la répétition de l'expérience.

On peut donc pratiquement représenter la perte par hystérésis, en ergs par cm³, par la formule de Steinmetz,

$$W = \eta \mathfrak{B}^{1,6},$$

où $\mathfrak{B}$ est l'induction maxima et η un coefficient qui ne doit pas dépasser 0,0027 dans les tôles d'induits et de transformateurs.

Le coefficient η déterminé pour une valeur de $\mathfrak{B}$ peut être considéré comme constant à 15 pour 100 près dans les limites pratiques de $\mathfrak{B}$. Une telle approximation est admissible étant donnée la variation avec le temps qu'éprouvent les noyaux des transformateurs et des dynamos.

Si les dimensions des échantillons sont assez faibles pour que les courants de Foucault ne produisent pas d'effet démagnétisant appréciable, la perte par hystérésis est indépendante de la fréquence du courant magnétisant, tout au moins dans les limites d'induction magnétique rencontrées dans les appareils industriels.

Avant tout essai d'hystérésis, il est important de ramener le témoin à l'état neutre en le soumettant à un champ alternatif décroissant. De même, avant de déterminer un cycle d'hystérésis entre certaines limites d'induction magnétique, il est bon d'effectuer un certain nombre de cycles entre les mêmes limites ; cette éducation de l'échantillon est nécessaire pour obtenir des courbes symétriques.

Méthode magnétométrique.—La méthode de M. Ewing pour la mesure de la perméabilité d'un échantillon de fer ou d'acier est basée sur l'action d'un long barreau vertical, aimanté par un solé-

noïde, sur un petit magnétomètre tel que celui qui a été décrit dans le chapitre précédent. Tous les fils de connexion sont tordus pour éviter l'action des courants sur l'aiguille mobile.

On sait que, si la longueur du noyau et de la bobine magnétisante est au moins égale à 500 fois le diamètre de celle-ci, on peut admettre que le flux est constant dans la région médiane du barreau. En désignant par $\mathfrak{I}$ l'intensité d'aimantation, par $\mathcal{H}$ la force magnétisante représentée par $4\pi \times 10^{-1}$ fois le nombre d'ampères-tours de la bobine par centimètre, on a, pour la perméabilité,

$$\mu = \frac{\mathcal{H} + 4\pi\,\mathfrak{I}}{\mathcal{H}}. \qquad (1)$$

La détermination de $\mathfrak{I}$ en fonction de $\mathcal{H}$ permet donc de calculer les valeurs correspondantes de μ. Le courant qui parcourt la bobine magnétisante B est fourni par une batterie d'accumulateurs, mesuré par un ampèremètre g et réglé par un rhéostat.

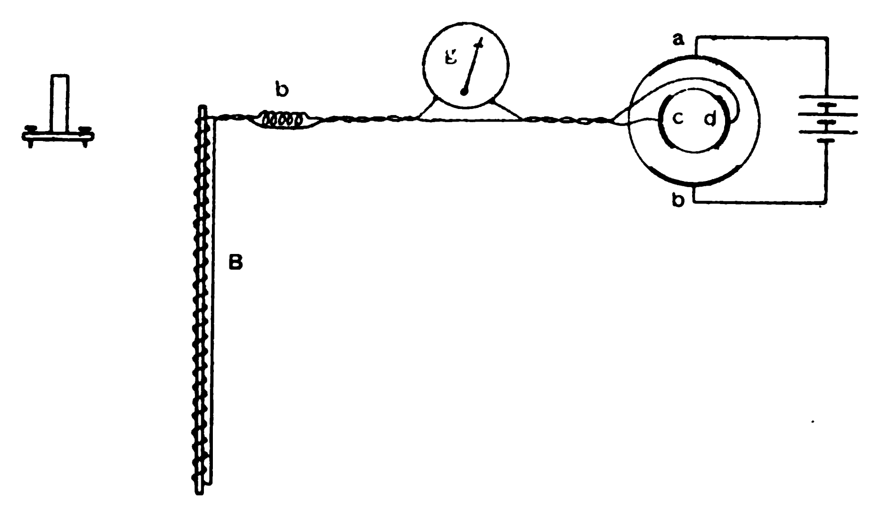


Fig. 167.

Ce rhéostat permet de faire varier le courant par degrés insensibles. Il est formé par un vase en poterie rempli d'une solution de sulfate zincique, dans laquelle plongent deux électrodes en zinc fixes, *a* et *b*, reliées aux accumulateurs, et deux électrodes mobiles,

c et *d*, portées par un tambour pouvant tourner autour d'un axe vertical. Les électrodes mobiles sont reliées au circuit par deux contacts à bagues. En tournant le tambour, on intervertit le courant et l'on fait passer son intensité par toutes les valeurs comprises entre un maximum positif et un maximum négatif.

L'action de la bobine B sur le magnétomètre est équilibrée par une bobine compensatrice *b*, agissant également, mais en sens inverse. L'effet assez minime de la composante verticale du magnétisme terrestre sur le barreau, qui tend à provoquer une légère aimantation de celui-ci, peut, si la précision des mesures l'exige, être annulé par l'action d'une bobine supplémentaire enroulée autour de B et traversée par un courant de nature à créer un champ dont l'intensité est égale à celle de cette composante, mais qui est dirigé en sens contraire.

Avant toute mesure, il convient d'amener l'éprouvette à l'état neutre. Pour cela, on fait passer dans la bobine B des courants alternés d'amplitudes décroissantes, obtenus en réduisant progressivement le nombre des couples secondaires ou en insérant des résistances croissantes dans le circuit.

Le magnétomètre est placé à une distance convenable du solénoïde, de manière que la droite, de longueur *a*, menée du centre de l'aimant mobile normalement à l'éprouvette, soit dans la direction est-ouest. Le barreau est amené à une hauteur telle que, pour un courant donné, l'effet sur l'aiguille soit maximum, ce qui a lieu quand la normale susdite passe par le pôle supérieur de l'éprouvette. Appelons *l* la longueur de celle-ci, supposée assez grande par rapport à *a*. En désignant par *s* la section du barreau et par $\mathfrak{I}$ son intensité d'aimantation, la composante horizontale du champ que le barreau produit à l'endroit de l'aiguille est

$$\mathcal{H}_1 = \mathfrak{I}s\left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{a^2 + l^2} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + l^2}}\right).$$

L'angle θ d'équilibre de l'aiguille est atteint lorsque le couple $\mathcal{H}_1 \mathcal{M} \cos\theta$ équivaut au couple $\mathcal{H}_2 \mathcal{M} \sin\theta$, $\mathcal{H}_2$ étant l'intensité horizontale du champ terrestre et $\mathcal{M}$ le moment magnétique de l'aiguille.

En réduisant, il vient

$$\mathfrak{I} = \frac{a^2}{s} \frac{\mathcal{H}_2 \operatorname{tang} \theta}{1 - \frac{a^3}{(a^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}}.$$

Si l est suffisamment grand par rapport à a, on peut écrire

$$\mathfrak{I} = \frac{a^3}{s} \mathcal{H}_2 \operatorname{tang} \theta. \qquad (2)$$

L'équation (2) combinée à (1) permet de trouver les valeurs de μ correspondant aux diverses valeurs de la force magnétisante.

En faisant varier cette dernière par degrés, on peut tracer la courbe $\mathfrak{B} = f(\mathcal{H})$ et déterminer, par la surface de cette courbe, la perte par hystérésis.

Cette méthode nécessite la connaissance de la composante horizontale du magnétisme terrestre et exige des échantillons de grande longueur, difficiles à préparer. De plus, le magnétomètre est très influençable par les champs parasites.

Méthodes balistiques. Dispositifs de MM. Rowland, Hopkinson et Ewing. — L'éprouvette peut être rectiligne et avoir une longueur équivalant à 500 diamètres au moins ou recevoir la forme de tore. Elle est entourée de la bobine magnétisante M, parcourue par un courant qu'on mesure à l'aide d'un ampèremètre a. Une bobine S, enroulée vers le milieu du barreau, est reliée au galvanomètre balistique G. Celui-ci peut être gradué au préalable au moyen d'un condensateur c et d'une pile étalon E qui permettent de déterminer la constante balistique K.

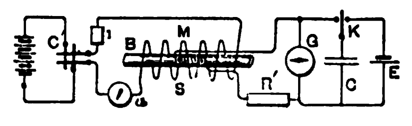


Fig. 168.

Lorsque l'instrument est du type Deprez et d'Arsonval, il faut, ou introduire une grande résistance dans son circuit pour rendre négligeable l'amortissement du cadre mobile par les courants induits, ou, de préférence, évaluer la constante balistique en se

servant de la bobine magnétisante même, dont on connaît le flux pour un courant donné. Il faut avoir soin de ne pas employer des barreaux dont la section est supérieure à quelques cm^2, sinon l'aimantation est trop lente et les lectures peuvent être faussées.

Un rhéostat, inséré dans le circuit de la batterie, sert à faire varier l'intensité du courant par degrés. On observe ainsi des impulsions successives au galvanomètre, qui permettent de calculer les accroissements progressifs du flux magnétique à travers le noyau. Appelons $\mathfrak{B}$ l'induction magnétique de celui-ci pour un courant i dans la bobine magnétisante et $\mathfrak{B}'$ la valeur correspondant à un courant i'; s, la section du noyau; n_1, le nombre de spires par unité de longueur de la bobine M; n, le nombre total de spires de la bobine S et r la résistance du circuit du galvanomètre. La décharge due à une variation $(i - i')$ du courant est exprimée par

$$q = \frac{(\mathfrak{B} - \mathfrak{B}')\,ns}{r} = \frac{\alpha}{K}.$$

Cette méthode fournit les valeurs successives de $\mathfrak{B}$, en fonction de la force magnétisante $4\pi n_1 i \times 10^{-1}$ et, par suite, les valeurs de la perméabilité

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{4\pi n_1 i \times 10^{-1}}.$$

La détermination des courbes d'aimantation est moins exacte par ce procédé que par la méthode magnétométrique, car les points successifs étant obtenus par l'addition des valeurs déduites des élongations successives lues au galvanomètre, les erreurs commises s'ajoutent.

Il est possible d'éviter cette accumulation des erreurs, en enroulant la bobine S sur un tube de verre couvrant la bobine magnétisante. Il suffit de retirer vivement la bobine S, pour obtenir dans le galvanomètre une impulsion permettant de calculer le flux total produit par le noyau et la bobine magnétisante.

La méthode précédente exige des barreaux de très grande longueur pour rendre négligeable l'influence des extrémités. Une remarque due à M. Fleming permet d'employer des cylindres dont la longueur est égale à 10 fois le diamètre seulement. Avec un tel barreau, si l'on place la bobine induite en un point distant d'une extrémité de

0,22 de la longueur, on obtient les résultats moyens que donnerait un barreau indéfini.

Pour éviter toute erreur, M. Rowland donne à l'éprouvette la forme d'un anneau, dont l'épaisseur est faible par rapport au diamètre. En entourant complètement un tel anneau d'une bobine magnétisante, on obtient à l'intérieur de celle-ci un champ constant d'intensité $\mathcal{H} = 4\pi\, n_1\, i \times 10^{-1}$. Une bobine auxiliaire, enroulée autour de l'anneau et reliée à un galvanomètre balistique, permet de mesurer le flux à travers le noyau. La forme annulaire s'obtient par le travail du tour ou, plus simplement, en empilant des anneaux découpés à l'emporte-pièce dans des tôles.

Dans les expériences précises, il est nécessaire de faire une correction pour tenir compte de la différence entre le diamètre du noyau et celui de la bobine S. Lorsque celle-ci est enroulée directement sur le noyau, l'intervalle entre ce dernier et la bobine est, en effet, traversé par un flux magnétique égal à la valeur de la force magnétisante multipliée par la section de cet intervalle. La correction est minime, si le noyau est assez fort.

Pour éviter les barreaux longs et les tores et permettre d'utiliser des éprouvettes cylindriques courtes, M. Hopkinson a adopté le dispositif suivant. Le barreau de 1 à 2 cm de diamètre dont il s'agit de mesurer la perméabilité est formé de deux tronçons C et C′ juxtaposés ; il traverse une masse de fer forgé A, deux bobines magnétisantes B B et une petite bobine D reliée au galvanomètre

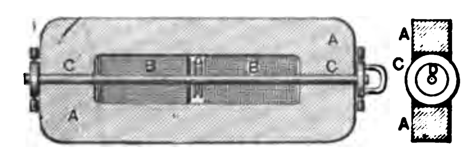


Fig. 169.

balistique. Cette bobine D est sollicitée latéralement par une bande de caoutchouc, de sorte que, si l'on écarte légèrement les deux tronçons C et C′, à l'aide des poignées qui les terminent, la bobine D est tirée hors de l'appareil et est traversée par un flux électrique en rapport avec l'induction magnétique du barreau.

Le bloc de fer et le barreau constituent un circuit magnétique

qui est le siége d'un flux produit par la force magnétomotrice $4\pi m i \times 10^{-1}$, m et i étant respectivement le nombre total de spires et le courant en ampères des bobines BB.

Soient $\mathcal{N}$ le flux magnétique ; l, la longueur en cm du barreau limitée par le vide du bloc A ; s, la section en cm² du barreau ; μ, la perméabilité de celui-ci ; l' cm, le parcours moyen des lignes de force magnétique dans la masse A ; s' cm² la section de celle-ci et μ' sa perméabilité. On a

$$4\pi m i \times 10^{-1} = \frac{\mathcal{N} l}{\mu s} + \frac{\mathcal{N} l'}{\mu' s'}.$$

Si l'on néglige le second terme, eu égard à la forte section s', on a simplement l'équation

$$4\pi m i \times 10^{-1} = \frac{\mathcal{N} l}{\mu s}. \qquad (1)$$

n étant le nombre de spires de la bobine témoin, le flux électrique induit par le retrait de celle-ci est

$$\frac{\mathcal{N} n}{R} = \frac{\alpha}{K}, \qquad (2)$$

si R désigne la résistance du circuit contenant le galvanomètre balistique.

En faisant varier le courant magnétisant i, mesuré à l'aide d'un ampèremètre, on peut déduire des équations (1) et (2) les valeurs de la perméabilité et de l'induction magnétique correspondant à diverses valeurs de la force magnétisante.

Les dérivations magnétiques, la reluctance des joints et celle de la masse de fer apportent dans les résultats des erreurs qui peuvent s'élever à 30 pour 100. En effet, comme la masse de fer est peu aimantée, la valeur de μ' est faible et la reluctance du bloc n'est pas négligeable.

La séparation de l'éprouvette en deux parties entraîne des manœuvres assez difficiles. M. Ewing a suggéré une modification de la méthode de M. Rowland, qui permet d'éviter l'accumulation des erreurs et qui s'applique à des éprouvettes en forme de barreau allongé, d'anneau ou de barreau court complété par une masse de fer. Nous considérerons ce dernier cas, qui permet de procéder

rapidement à l'essai des métaux destinés à la confection des carcasses des dynamos.

Dans la méthode de M. Rowland, on procède par accroissements progressifs de l'aimantation du barreau ; dans celle de M. Ewing, on revient, après chaque observation, au point d'aimantation initiale A, voisin de la saturation, après avoir fait parcourir au

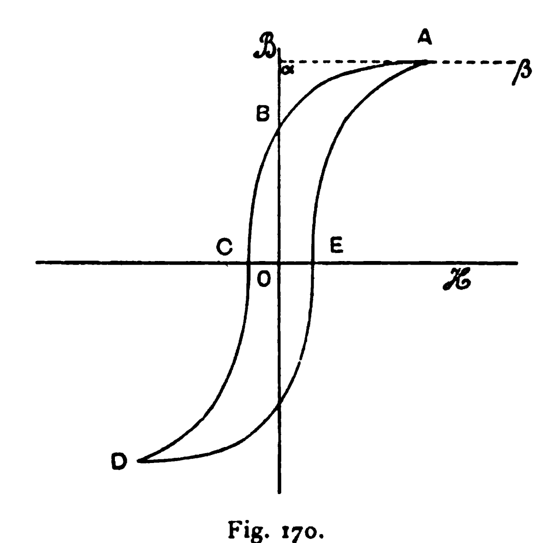


Fig. 170.

barreau un cycle complet d'aimantation ; de la sorte, on ramène chaque fois l'éprouvette dans les mêmes conditions magnétiques. Il suffit de déterminer la courbe A B C D ; la courbe D E A est obtenue par symétrie, fig. 170.

Le courant magnétisant est fourni par une batterie d'accumulateurs B et estimé par un ampèremètre *a*, fig. 171. La variation du flux magnétique est mesurée par l'induction qu'elle détermine dans une bobine *d'* reliée à un galvanomètre balistique G. Celui-ci est gradué à l'aide du flux dû à un solénoïde très allongé *b*, autour duquel est enroulée une petite bobine *d*, insérée dans le circuit du galvanomètre.

c_1 est un commutateur à deux directions permettant d'intervertir le sens du courant dans la bobine magnétisante *b'*; r_1 est une résistance convenablement choisie ; r_2 une résistance réglable pouvant

être mise en court-circuit par la clef c_3. Dans l'état des connexions indiqué, le courant parcourt r_1, a, c_1 et b'. Appelons $+ I_m$

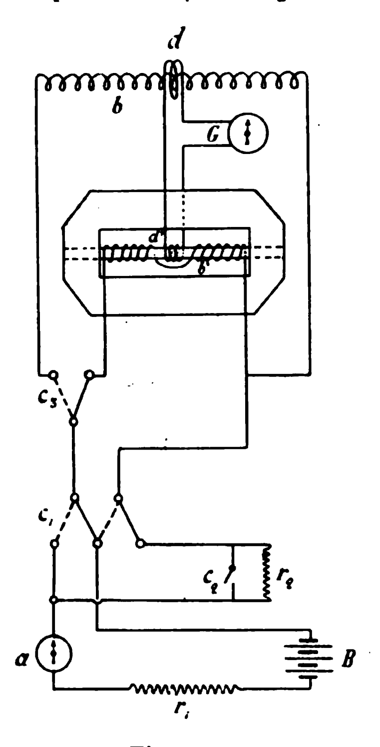


Fig. 171.

l'intensité de ce courant et supposons qu'elle soit capable de donner au barreau sa plus grande aimantation, correspondant au point A de la courbe du magnétisme, fig. 170. Ayant réglé la résistance r_2, on ouvre brusquement c_2. Le courant diminue et l'on observe au galvanomètre balistique une élongation qui permet de déterminer la diminution du flux magnétique. On revient alors à l'aimantation initiale A, après avoir fait parcourir au barreau un cycle complet; pour cela, on déplace le commutateur c_1 à gauche, puis à droite après avoir refermé c_2, de manière à donner au courant magnétisant les valeurs successives $- I_m$ et $+ I_m$. En répétant ces opérations avec des valeurs croissantes de r_2, on obtient les points de la partie AB de la courbe du magnétisme.

Afin de trouver les points de la partie BD de la courbe, on procède comme suit, après avoir interverti les connexions de la batterie et placé le commutateur c_1 dans la position indiquée en pointillé. On ouvre c_2, de manière à introduire r_2 en circuit au moment où l'on tourne le commutateur c_1 à droite. On peut ainsi donner au courant magnétisant toutes les valeurs comprises entre o et $-I_m$. Les élongations accusées par le galvanomètre balistique sont proportionnelles aux ordonnées de la courbe, comptées à partir d'une parallèle $\alpha\beta$ à l'axe des abscisses. On revient au point A en fermant c_2 et en remettant ensuite c_1 dans sa première position.

L'axe des abscisses de la courbe peut être tracé lorsqu'on a déterminé les points symétriques A et D.

M. Ewing a remarqué qu'on dresse des courbes très régulières, particulièrement pour les valeurs faibles de l'aimantation, lorsqu'on commence par faire parcourir plusieurs cycles au barreau, en manœuvrant c_1 de manière à obtenir des courants $+I_m$ et $-I_m$.

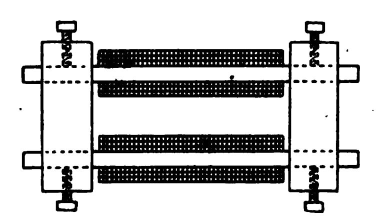


Fig. 172.

Pour éviter l'erreur due à la reluctance de la culasse, M. Ewing a adopté la disposition suivante, fig. 172. Les éprouvettes, au nombre de deux, sont réunies par des masses de fer dont la reluctance est $\mathcal{R}'$ pour une induction $\mathcal{B}'$. On a, pour un écartement l des armatures et des bobines magnétisantes données,

$$4\pi mi \times 10^{-1} = \mathcal{B}\frac{l}{\mu} + \mathcal{B}'s'\mathcal{R}'.$$

Pour éliminer le terme $\mathcal{B}'s'\mathcal{R}'$, on fait une seconde expérience avec des bobines contenant moitié moins de spires et un écartement réduit également de moitié. La formule relative à la seconde expé-

rience est, pour un même flux dans le circuit magnétique, correspondant à la même élongation balistique,

$$\frac{4\pi mi'}{2} \times 10^{-1} = \mathfrak{B}\frac{l}{2\mu} + \mathfrak{B}' s' \mathfrak{R}'.$$

De la comparaison de ces équations, on tire

$$\mu = \frac{10\,\mathfrak{B}l}{4\pi m(2i - i')}.$$

Comme la valeur de $\mathfrak{R}'$ n'est pas indépendante de $\mathfrak{B}$, il faut répéter les deux expériences pour chaque valeur de $\mathfrak{B}$, ce qui rend la méthode assez laborieuse.

Lorsqu'un barreau a été étudié exactement par ce procédé, il peut servir à calculer les termes de correction à introduire dans la méthode de M. Hopkinson pour éliminer l'erreur due à la masse de fer.

Si, en effet, on reprend l'équation

$$4\pi mi \times 10^{-1} = \frac{\mathfrak{N}l}{\mu s} + \frac{\mathfrak{N}l'}{\mu' s'},$$

il est possible de déterminer avec le barreau étalonné le terme $\frac{\mathfrak{N}l'}{\mu' s'}$ pour chaque valeur du flux, et, par suite, de dresser une table des valeurs de ce terme pour diverses valeurs de $\frac{\mathfrak{N}}{s} = \mathfrak{B}$.

Méthodes basées sur la force portante. Appareils de M. Thompson et de M. Du Bois. — La force portante d'un barreau aimanté est exprimée, en dynes, en fonction de l'induction magnétique $\mathfrak{B}$ et de la section s, par la formule

$$p = \frac{\mathfrak{B}^2 s}{8\pi}.$$

Si p est donné en grammes et s en cm², on a donc

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi p \times 981}{\mathfrak{H}^2 s}}. \qquad (1)$$

Pour utiliser cette formule, il suffit de dresser verticalement

l'appareil de M. Hopkinson et de séparer les deux tronçons du barreau en agissant sur l'un d'eux, glissant à frottement doux dans la masse de fer extérieure. La valeur de $\mathcal{H}$ est égale à $4\pi n_1 i \times 10^{-1}$, $n_1 i$ étant le nombre d'ampères-tours par centimètre de la bobine magnétisante.

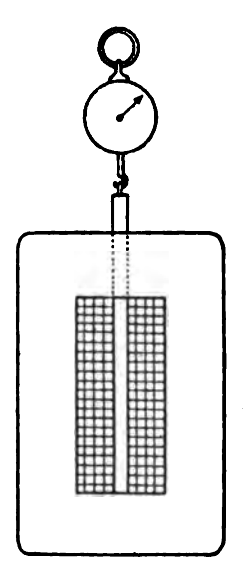


Fig. 173.

M. Sylv. Thompson a donné à l'appareil la forme ci-dessus. Le barreau éprouvette vient toucher le bloc de fer par son bout inférieur bien dressé et l'on tire sur le bout supérieur à l'aide d'une balance à ressort. Pour ne pas exercer de secousses capables de détacher prématurément le barreau, il convient, après avoir donné une certaine tension au ressort, de provoquer la séparation par une diminution progressive du courant magnétisant.

On remarquera que, d'après la formule (1), l'erreur relative commise sur la valeur de la perméabilité n'est que la moitié de l'erreur résultant de la lecture de p. Néanmoins, la méthode est peu exacte. Non seulement on néglige la reluctance de la masse de fer environnant le barreau, mais il existe une grande incertitude quant à la surface réelle de contact, s, du barreau avec cette masse.

M. Du Bois a réalisé une autre disposition, commode pour les mesures industrielles, dans laquelle ce dernier élément d'erreur est éliminé.

L'éprouvette T est glissée entre des pièces polaires PP′ en fer et entourée d'une bobine magnétisante B. Le circuit magnétique est complété par une armature massive AA pivotant sur des couteaux disposés de côté. Un contrepoids D équilibre le long bras du fléau. L'attraction magnétique qui tend à faire basculer le fléau vers la gauche est compensée par un poids mobile glissant le long d'une règle divisée. Le moment du poids est sensiblement proportionnel au carré de l'induction magnétique à travers le barreau. L'échelle est graduée empiriquement de manière qu'en multipliant la lecture par la racine carrée du poids employé, on obtienne la valeur de l'induction.

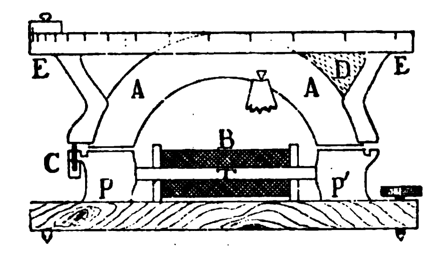


Fig. 174.

Pour corriger les erreurs dues aux pièces polaires et à l'armature, on porte, dans le tracé de la courbe du magnétisme, les abscisses à partir d'un axe curviligne dessiné sur une feuille transparente fournie avec l'instrument.

Un tel appareil a l'avantage de pouvoir être mis entre les mains d'un ouvrier intelligent.

Méthodes basées sur une mesure de champ magnétique.— D'autres méthodes pratiques, à l'usage des ateliers, sont basées sur l'emploi d'un barreau inséré dans un circuit magnétique présentant un entrefer étroit. On peut, par exemple, comme M. Bruger, former un circuit magnétique à l'aide d'un barreau droit et d'un barreau en forme de C, en réservant un mince entrefer dans lequel on dispose une spirale de bismuth permettant de mesurer le champ produit dans cet espace sous l'influence de la bobine magnétisante

qui entoure les noyaux. En graduant l'appareil avec un barreau type, on déduit des variations de la résistance du bismuth la perméabilité des éprouvettes par rapport à celle du barreau étalon. L'emploi du bismuth exige des intensités de champ assez fortes.

MM. Koepsel et Kennely évaluent l'intensité du champ dans un entrefer analogue, par le couple déviant exercé sur une bobine, semblable à celle du galvanomètre Deprez et d'Arsonval, insérée dans cet entrefer et parcourue par un courant déterminé. Les

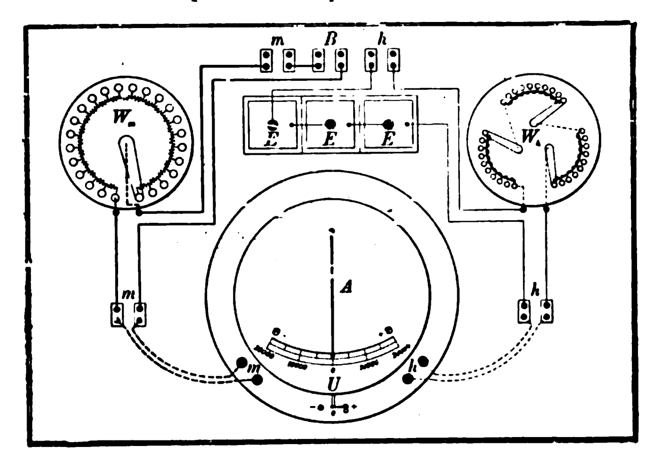


Fig. 175.

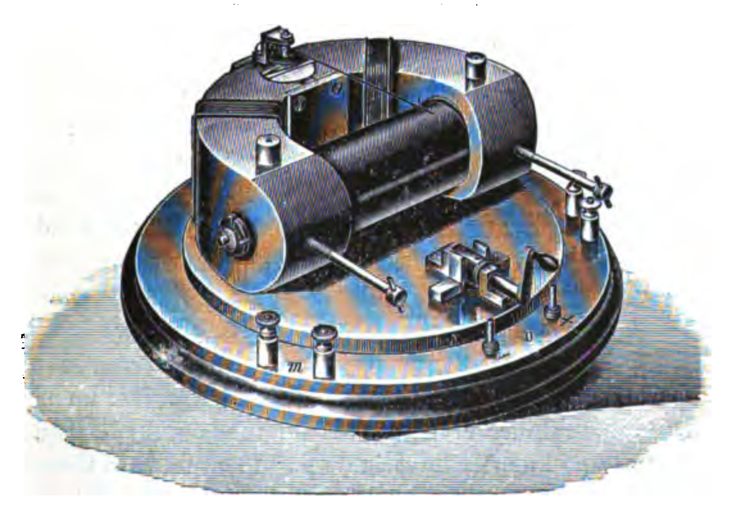


Fig. 176.

fig. 175 et 176 montrent la forme portative d'un instrument de ce genre que construisent MM. Siemens et Halske.

Le barreau, entouré de la bobine magnétisante, forme un circuit magnétique avec deux masses de fer et un noyau cylindrique entouré d'une bobine galvanométrique.

Entre les bornes *m* est intercalé un rhéostat destiné à faire varier le courant magnétisant qu'on mesure à l'aide d'un ampèremètre et dont un inverseur permet de changer le sens.

Un autre rhéostat, inséré dans le circuit du cadre galvanométrique donne le moyen de graduer le courant que trois éléments secs E envoient dans ce cadre ; ce courant s'estime à l'aide d'un milli-ampèremètre.

Les bobines enroulées sur les masses de fer servent à neutraliser le magnétisme rémanent de celles-ci.

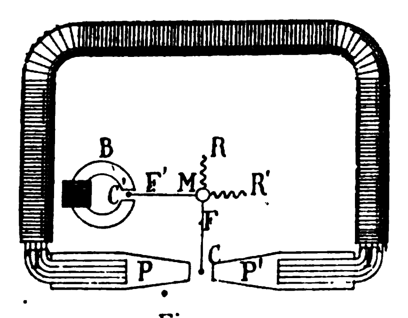


Fig. 177.

On peut rapprocher des procédés précédents la méthode de M. Ewing propre à relever les courbes du magnétisme correspondant à des cycles parcourus en une fraction de seconde. La fig. 177 indique le schéma de l'appareil dont la fig. 178 représente une vue d'ensemble. On constitue un circuit magnétique à l'aide du fer essayé, employé sous forme de bandes minces pour éviter les courants de Foucault, d'une culasse et de pièces polaires. Les noyaux sont entourés de bobines magnétisantes. Entre les pièces polaires PP′ est tendu un fil C que parcourt un courant constant fourni par une pile. Le courant magnétisant traverse un fil C′, tendu dans une rainure creusée dans un tube en fer B, lequel est aimanté sous une intensité invariable par un courant indépendant.

La variation du courant magnétisant, d'une part, et celle du flux

magnétique produit dans le fer essayé, d'autre part, modifient les forces électromagnétiques qui agissent sur les fils C' et C. Ce dernier est sollicité en raison de l'importance du flux magnétique, le premier en raison de l'intensité de la force magnétisante. Les deux déplacements, qui ont lieu dans des directions normales, communiquent une double rotation à un miroir M, relié aux conducteurs C, C' à l'aide de fils F, F', tendus par des ressorts R, R'.

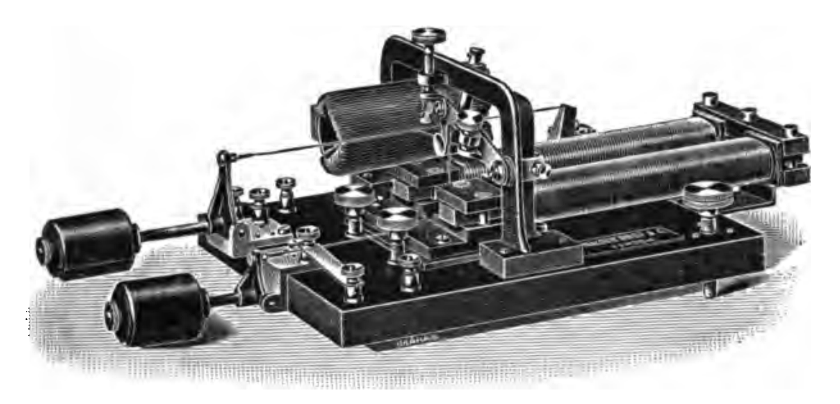


Fig. 178.

Si l'on envoie un faisceau lumineux sur le miroir, le faisceau réfléchi décrit les courbes d'aimantation sur un écran. Ces courbes peuvent être enregistrées par la photographie. Le peu d'inertie des pièces mobiles permet de réduire la durée du cycle à $^1/_{20}$ de seconde.

Le courant magnétisant est gradué à l'aide du rhéostat liquide à rotation, décrit à propos de la méthode magnétométrique.

Méthodes d'opposition. — MM. Edison, Eickemeyer et Ewing ont imaginé des dispositifs utilisant, pour la comparaison des perméabilités, des combinaisons analogues à celle du pont de Wheatstone pour les conductibilités électriques.

Dans ces méthodes, on compare la perméabilité d'un barreau à celle d'un barreau de forme identique étalonné au préalable par une méthode indirecte.

Dans l'appareil d'Ewing, les deux barreaux cylindriques sont disposés parallèlement, entourés de bobines semblables et emboîtés

par les extrémités dans deux culasses identiques. Celles-ci sont pourvues de noyaux en fer qui sont recourbés l'un vers l'autre. Dans l'entrefer existant entre les extrémités des noyaux est une aiguille aimantée qui joue le rôle du galvanoscope dans le pont de Wheatstone.

Si l'on envoie un courant dans les deux bobines magnétisantes en série et si les barreaux sont identiques, les deux culasses qui les terminent restent au même potentiel magnétique et aucun flux dérivé ne traverse le pont comprenant l'aiguille indicatrice. Mais dans le cas où les barreaux sont dissemblables, un flux magnétique dérivé fait dévier l'aiguille et, pour rétablir l'équilibre, il faut faire varier le nombre des spires de l'une des bobines, les spires supprimées étant remplacées par des résistances équivalentes pour ne pas modifier le courant.

Mesure de l'hystérésis par le wattmètre. — Cette méthode d'essai s'applique spécialement aux tôles employées dans la construction des noyaux des transformateurs, des induits des dynamos et, en général, de tous les électro-aimants soumis à des forces magnétisantes variables.

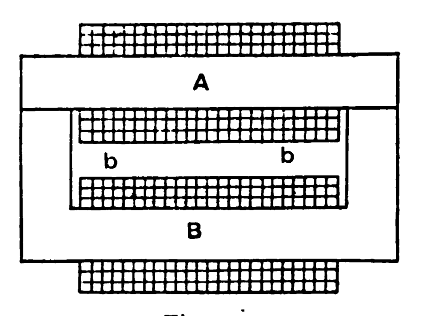


Fig. 179.

Un circuit magnétique est constitué au moyen d'un paquet de bandes minces A, d'un poids connu, débitées dans la tôle à essayer, et d'un autre paquet B formé de tôles découpées en U. Les bandes sont isolées au papier ou au vernis, comme dans les transformateurs. *bb* sont des bobines magnétisantes traversées par le courant périodique que fournit une machine donnant une courbe de courant sinusoïdale.

On estime la puissance dépensée dans les bobines à l'aide d'un wattmètre. Les bobines ont peu de spires et sont traversées par des courants intenses pour que le décalage soit faible et que l'erreur du wattmètre soit minime.

On calibre au préalable l'appareil en utilisant un paquet de tôles A du même fer que celui qui entre dans la constitution de B. La dépense observée au wattmètre représente les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans les noyaux, et la perte par effet Joule dans les bobines. La perte par effet Joule peut être négligée pour les valeurs élevées de l'aimantation des noyaux. Elle résulte de la résistance des bobines magnétisantes et de l'intensité efficace du courant. La perte par courants de Foucault est également assez faible lorsque les bandes de fer ont moins de 0,3 mm d'épaisseur. La dépense accusée par le wattmètre pendant le tarage représente donc, pour la plus grande partie, la perte par hystérésis. La reluctance des joints n'occasionne aucun supplément de perte, puisque l'hystérésis est nulle dans l'air; elle n'influence que le courant nécessaire pour obtenir l'induction magnétique voulue. Les pertes se répartissent proportionnellement aux poids. On peut donc conclure de cette première mesure la perte dans la partie B du circuit. En substituant ensuite à A le paquet de tôles à essayer, on obtient par différence les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans l'éprouvette.

Un voltmètre relié à une bobine auxiliaire enroulée sur le noyau permet d'évaluer l'induction maxima à laquelle le fer est porté.

Cette méthode ne donne pas des résultats aussi précis que la méthode balistique, car on doit admettre que le courant et le flux sont sinusoïdaux pour déduire l'induction magnétique et la force magnétomotrice maxima de la force électromotrice et du courant efficaces. Or, si même l'on dispose d'un courant sinusoïdal, la courbe du flux est surbaissée quand on dépasse des inductions de 10 000 à 14 000 C. G. S.

Si le laminage des noyaux n'était pas suffisant pour permettre de négliger les courants de Foucault, on pourrait, comme la perte par hystérésis est proportionnelle à la fréquence et la perte par courants de Foucault au carré de celle-ci, séparer les deux causes de perte en faisant des expériences à deux fréquences différentes.

Hystérésimètres. — On donne ce nom à des instruments destinés à des mesures rapides et qui peuvent être mis entre les mains d'agents subalternes.

Dans ces appareils, on ramène la mesure du travail d'hystérésis à celle d'un couple. Dans le système de M. Ewing l'éprouvette consiste en un paquet de 6 à 8 tôles minces de 7,5 cm de longueur sur 1,65 cm de largeur, serrées dans un support auquel on communique un mouvement de rotation par l'intermédiaire d'une manivelle et d'une poulie de friction, fig. 180. L'aimant qui provoque l'induction bascule sur des couteaux dont la ligne de contact passe par l'axe de rotation de l'éprouvette.

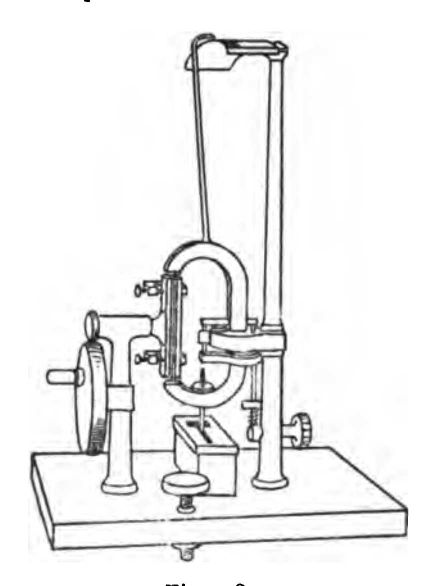


Fig. 180.

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, si l'on admet que la seule perte est celle due à l'hystérésis, le travail par tour de cette dernière est égal au travail mécanique dépensé, lequel est mesuré en une révolution, c'est à dire en un cycle, par 2π fois le couple moyen C :

$$W = 2\pi C.$$

Comme W et C sont indépendants de la vitesse, on peut faire

tourner l'appareil à la main; si la période d'oscillation de l'aimant est assez grande relativement à celle d'une révolution de l'éprouvette, la déviation de l'aimant, lue sur la graduation, ne dépend pas du nombre de tours de l'éprouvette et peut servir de mesure au travail de l'hystérésis.

La vitesse de rotation ne doit pas toutefois devenir telle que les courants de Foucault dans le système mobile exercent une réaction appréciable sur l'inducteur.

Un contrepoids réglable, fixé à la partie inférieure de l'aimant, permet d'obtenir une déviation convenable. Afin que le flux de force qui traverse les échantillons soumis à l'essai soit à peu près indépendant de la perméabilité de ceux-ci, on a soin de ménager de grands entrefers devant lesquels la reluctance des éprouvettes est négligeable. L'aimant est proportionné de manière que l'induction magnétique soit voisine de 4 000 C. G. S. L'expérience a prouvé que le poids et l'épaisseur des échantillons ne demandent pas un ajustement précis, si la longueur des bandes est constante.

Chaque instrument est pourvu d'éprouvettes étalons et de tables donnant les pertes par hystérésis trouvées pour celles-ci à l'aide d'une méthode indirecte. En comparant la déviation donnée par l'étalon introduit dans l'appareil avec la déviation d'un échantillon essayé, on peut déduire par une proportion le travail par hystérésis de ce dernier, sous l'induction 4 000. Les pertes sous d'autres inductions se déterminent simplement en utilisant la formule de M. Steinmetz,

$$W = \eta \mathfrak{B}^{1,6} v,$$

v étant en cm^3 le volume de fer du noyau.

L'instrument de M. Ewing donne la perte par hystérésis alternative, toujours inférieure à l'hystérésis tournante.

Pour évaluer cette dernière en se mettant dans des conditions analogues à celles des induits de dynamos, MM. Marcel Deprez et Blondel ont imaginé des hystérésimètres où les éprouvettes sont circulaires. Dans l'appareil de M. Blondel, fig. 181, un anneau formé de tôles minces est porté par un arbre pivotant entre pointes et dirigé par un ressort en hélice; un index porté par l'arbre indique l'orien-

tation de l'anneau. Un aimant en fer à cheval entoure celui-ci et est mis en mouvement par une manivelle et une roue d'angle.

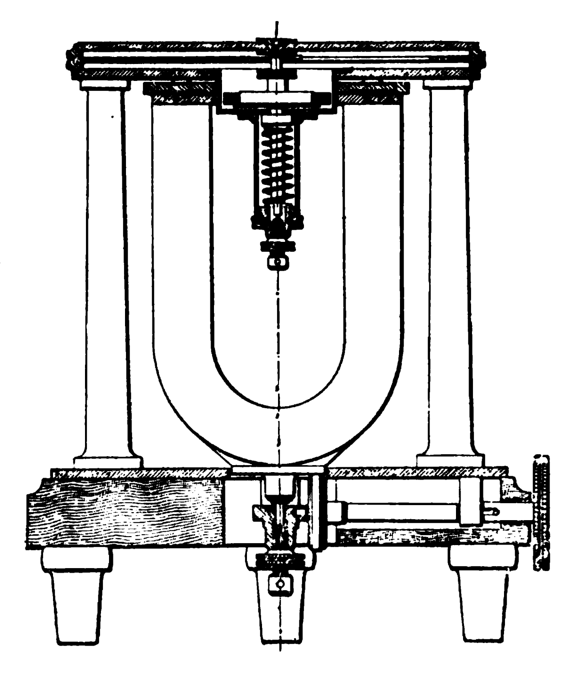


Fig. 181.

L'instrument est dépourvu de zéro ; on fait tourner l'aimant successivement dans les deux sens et on relève les déviations α, α' radians.

Si θ est le coefficient de torsion du ressort, en ergs par radian, le travail de l'hystérésis est par cycle

$$W = 2\pi C = \pi\,\theta\,(\alpha - \alpha').$$

Le constructeur, M. Carpentier, joint à l'instrument un échantillon qui sert d'étalon de comparaison et dont on a déterminé le coefficient η de la loi de Steinmetz; l'induction magnétique produite par l'aimant est également connue.

APPLICATIONS

Chapitre XXI.

RÉSISTANCE DES GALVANOMÈTRES [1].

Méthode du pont de Wheatstone. — La résistance du cadre d'un galvanomètre peut être mesurée par l'une des méthodes exposées précédemment, par celle du pont de Wheatstone par exemple, qui est susceptible d'une grande exactitude. On aura soin, si le galvanomètre à mesurer est très sensible, de caler l'équipage mobile pour ne pas détériorer l'appareil par l'action électromagnétique du courant servant à l'essai. La fig. 182 indique les connexions recommandées pour cette mesure. Un élément de pile est relié à une boîte de résistance *rr'* sur laquelle est dérivé le pont. Les clefs de circuit 1 et 2 sont fermées successivement, puis ouvertes dans

[1] Les méthodes de mesure de la résistance des galvanomètres, ainsi que celles de la force électromotrice et de la résistance intérieure des piles, sont d'excellents exercices pour permettre aux débutants de se familiariser avec les procédés de discussion des essais. Elles ont l'avantage de n'exiger que des courants faibles, sans danger pour les opérateurs et les appareils.

l'ordre inverse, pour éviter les extra-courants dans le galvanomètre auxiliaire G. On opère les tâtonnements comme il a été indiqué dans l'étude de la méthode du pont, chap. XIII. On a soin de déboucher au début une résistance r' minime, pour ne pas obtenir un courant

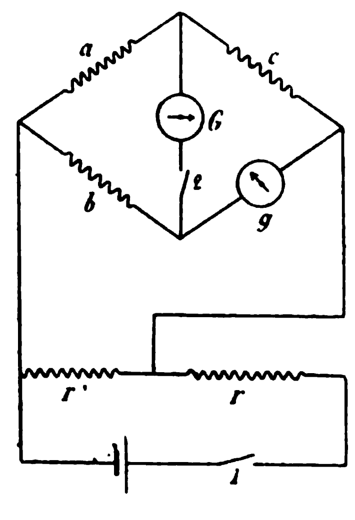


Fig. 182.

trop intense. En approchant de l'équilibre, on peut accroître r', en ayant soin de ne laisser les clefs abaissées que juste le temps nécessaire pour les mesures, afin de ne pas échauffer les résistances du pont.

On a vu, au chap. XIII, comment s'estime l'erreur limite d'une telle expérience.

Méthode des déviations réduites. — Lorsqu'on ne dispose pas d'un galvanomètre auxiliaire pour effectuer l'essai, on a recours à des méthodes spéciales.

Dans la méthode des déviations réduites, on réalise un circuit à l'aide du galvanomètre, d'une boite de résistance et d'une pile shuntée au besoin, comme l'indique la fig. 183.

Si la résistance du shunt r' est assez faible pour que les variations de résistance dans la dérivation du galvanomètre n'apportent pas de

changement appréciable dans la différence de potentiel V aux extrémités de ce shunt, on a, en bouchant toutes les résistances de la boîte r, de manière à obtenir la plus grande déviation possible,

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{V}{g}.$$

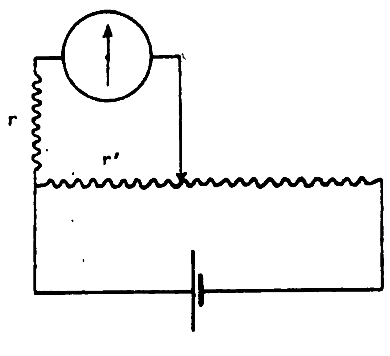


Fig. 183.

En débouchant dans la caisse une résistance r, il vient

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{V}{r+g};$$

d'où, en divisant les deux équations membre à membre,

$$g = \frac{\alpha' r}{\alpha - \alpha'}.$$

Il est facile de vérifier que la valeur minima de l'erreur relative $\frac{dg}{g}$ correspond à $\frac{\alpha}{\alpha'} = 2{,}4$.

L'erreur n'est pas sensiblement plus grande si l'on adopte le rapport $\frac{\alpha}{\alpha'} = 2$; la méthode est alors connue sous le nom de ***méthode de la demi-déviation.*** Dans ce cas, la résistance en série avec le galvanomètre dans la seconde expérience est choisie de manière à réduire de moitié la déviation α obtenue d'abord; de la sorte, si la résistance du shunt de la pile est négligeable, on a

$$g = r$$

et

$$\frac{dg}{g} = 6\,\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Ce résultat montre que l'approximation dont la méthode est susceptible n'est pas grande. Aux erreurs de lecture peut encore s'ajouter celle provenant d'une polarisation éventuelle de la pile pendant les tâtonnements. D'ailleurs, la différence de potentiel aux extrémités du shunt n'est pas tout à fait invariable pendant les deux expériences. Si l'on appelle V et aV ses valeurs successives, a pouvant être calculé par l'application des lois de Kirchhoff, on arrive à la formule exacte

$$g = \frac{\alpha' r}{a\alpha - \alpha'}.$$

Le résultat à adopter est $g \pm dg$.

Méthode d'égale déviation. — On met en circuit le galvanomètre avec une pile et une résistance r' de manière à obtenir une déviation α telle que

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{e}{r' + g}, \quad (1)$$

la résistance de la pile étant supposée négligeable.

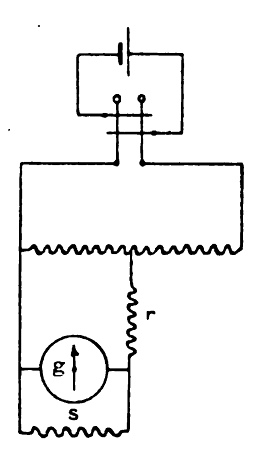


Fig. 184.

On shunte ensuite le galvanomètre et l'on ramène la même déviation en diminuant la résistance en série. Soit r la nouvelle résistance, s le shunt ; on a

$$\frac{\alpha}{k}=\frac{e}{r+\frac{gs}{g+s}}\,\frac{s}{s+g}. \qquad (2)$$

De là on déduit

$$g=\frac{s\,(r'-r)}{r}. \qquad (3)$$

Une erreur sur g peut provenir d'une erreur de réglage de la résistance r, amenée elle-même par une erreur de lecture ; or, on déduit de (2) et de (3)

$$dg=-\frac{sr'\,dr}{r^2}, \qquad (4)$$

$$\frac{d\alpha}{k}=-e\,\frac{s}{s+g}\,\frac{dr}{\left(r+\frac{gs}{g+s}\right)^2},$$

$$\frac{d\alpha}{\alpha}=-\frac{dr}{r+\frac{gs}{g+s}}.$$

Remplaçant, dans (4), dr par sa valeur tirée de l'équation ci-dessus, on obtient

$$dg=\frac{sr'}{r^2}\left(r+\frac{gs}{g+s}\right)\frac{d\alpha}{\alpha}$$

et ensuite

$$\frac{dg}{g}=\frac{r'}{r\,(r'-r)}\left(r+\frac{gs}{g+s}\right)\frac{d\alpha}{\alpha}.$$

Enfin, en substituant à r sa valeur tirée de (3), il vient

$$\frac{dg}{g}=\left(1+\frac{s}{g}\right)\left(1+\frac{g}{r'}\right)\frac{d\alpha}{\alpha}. \text{ (M. de Weydlich)}$$

Cette équation apprend que l'erreur relative est diminuée lorsqu'on affaiblit le shunt s et qu'on augmente r'. Cependant, il n'y a pas intérêt à choisir un shunt très inférieur à g, car la somme $1+\frac{s}{g}$ diminue assez lentement quand s devient plus petit que g, et la déviation décroît au contraire très rapidement avec s. Or, il

faut chercher à obtenir la lecture la plus grande possible. Un raisonnement analogue montre qu'il n'y a pas grand avantage à rendre r' très supérieur à g. Cependant, on est amené à adopter une forte résistance r', si le galvanomètre est doué d'une grande sensibilité. Lorsqu'on ne dispose pas d'une résistance suffisante, on peut shunter la pile.

Si s est assez petit par rapport à g et g par rapport à r', on a approximativement

$$\frac{dg}{g} = \frac{d\alpha}{\alpha},$$

ce qui montre la supériorité de cette méthode sur la précédente.

On peut faire, comme dans celle-ci, une correction pour tenir compte de la variation de tension aux extrémités du shunt de la pile. On a, dans ce cas,

$$\frac{e}{r'+g} = \frac{a\,e\,s}{r\,(s+g)+sg},$$

d'où

$$g = \frac{s\,(ar'-r)}{r+(1-a)\,s},$$

au lieu de

$$g = \frac{s\,(r'-r)}{r}.$$

Pratiquement, la valeur de g est influencée par le fait qu'on peut modifier r et r' de quantités dr et dr' sans faire varier la déviation d'une manière appréciable. On a, en supposant que les erreurs qui en résultent s'ajoutent,

$$dg = s\,\frac{rdr' + r'\,dr}{r^2}.$$

Méthode de Lord Kelvin. — Une pile, shuntée suivant le dispositif ordinaire, fournit le courant dans un pont de Wheatstone, dont le galvanomètre occupe la branche de résistance inconnue, fig. 185. Les côtés a, b, c sont réglés jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre reste invariable dans les deux positions de la clef insérée dans l'une des diagonales. On a alors, suivant la propriété générale des combinaisons de circuits de ce genre,

$$g = \frac{bc}{a}.$$

En discutant la méthode, M. Kempe trouve qu'il faut prendre pour *b* une résistance aussi faible et pour *a* une résistance aussi forte que possible, la pile réunissant le point de jonction des branches les moins résistantes au point de jonction des branches

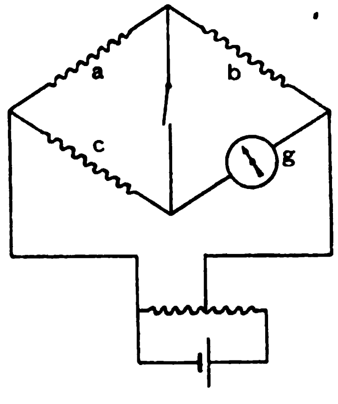


Fig. 185.

les plus résistantes et la déviation étant maxima. L'erreur limite s'apprécie expérimentalement, comme en général dans toutes les méthodes, en recherchant entre quelles limites on peut dérégler le pont sans apporter une différence sensible dans la déviation du galvanomètre. Pour obtenir une déviation aussi grande que possible, on peut considérer l'une des extrémités de l'échelle comme zéro de la graduation [1].

---

[1] Pour donner une idée de la précision relative des méthodes exposées dans ce chapitre, voici quelques résultats obtenus par un élève de l'Institut Montefiore, en opérant sur un galvanomètre qu'il avait construit :

Méthode du pont de Wheatstone	$\frac{dg}{g} = 0{,}0004$
Méthode des déviations réduites	0,0204
Méthode d'égale déviation	0,0035
Méthode de Lord Kelvin	0,0017.

Chapitre XXII.

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

Méthodes de déviation. — La mesure de la résistance des électrolytes présente des difficultés par suite de la polarisation des électrodes, qui produit un accroissement apparent de résistance. On cherchera à utiliser pour l'essai une force électromotrice assez grande pour rendre négligeable celle due à la polarisation. D'après MM. Lippmann et Paalzow, un métal ne se polarise pas dans une solution d'un de ses sels. De là, l'emploi des électrodes dites impolarisables.

On peut se servir de la méthode suivante, destinée à éliminer l'influence de la polarisation. L'électrolyte à essayer est versé dans un tube en V calibré. Les électrodes sont des rondelles transversales, en même métal que celui du sel si c'est possible, ou, dans le cas contraire, en platine platiné. On fait passer dans l'électrolyte un courant qu'on mesure au galvanomètre. On rapproche les électrodes et manœuvre un rhéostat intercalé dans le circuit, de manière à maintenir le courant constant. La résistance ajoutée représente la résistance de la partie de la colonne liquide supprimée.

La résistance des électrolytes diminuant rapidement quand la température augmente, il est important de maintenir celle-ci invariable pendant l'essai. Pour cela, on plonge le tube dans un bain

d'eau pourvu d'un thermomètre et l'on restreint la durée du passage du courant autant que possible. La résistibilité de l'électrolyte se déduit des dimensions du volume de liquide retranché.

Autre disposition. En deux points de la colonne liquide compris entre les électrodes, on fait arriver des fils de platine. On observe la différence de potentiel des extrémités de ces fils, à l'aide d'un électromètre ou d'un condensateur adjoint à un galvanomètre balistique. En comparant cette différence à la chute de tension dans une résistance métallique connue, intercalée dans le même circuit, on connaît la résistance comprise entre les fils de platine.

Méthodes de zéro. Dispositifs de M. Bouty et de M. Kohlrausch. — M. Bouty a adopté un dispositif dans lequel il fait usage d'électrodes impolarisables, consistant en une solution de sulfate de zinc dans laquelle le courant arrive par des électrodes en zinc amalgamé. Le liquide à essayer est enfermé dans un tube en double hélice, terminé par des coupes élargies et plongeant dans

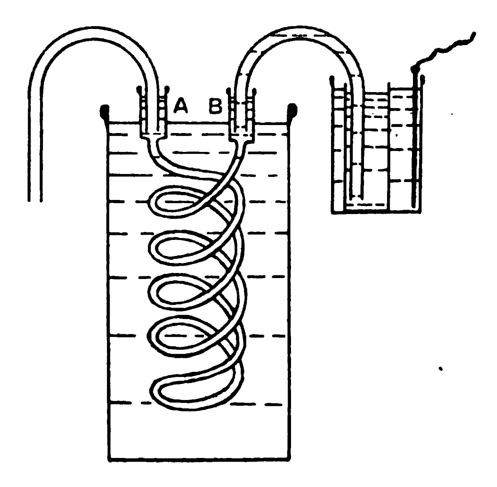


Fig. 186.

un bain à température constante. Les coupes A et B communiquent par des siphons gros et courts avec des vases poreux, dont un seul est représenté dans la fig. 186, et qui sont remplis, comme les siphons, du liquide à l'essai. Les vases poreux sont placés dans des auges con-

tenant la solution de sulfate de zinc et les électrodes en zinc par lesquelles arrive le courant. M. Bouty relève la différence de potentiel au moyen d'un électromètre Lippmann, qui communique avec le liquide des auges et qu'il ramène au zéro par l'action compensatrice d'une dérivation prise sur une boîte de résistance traversée par le courant d'une pile, fig. 187.

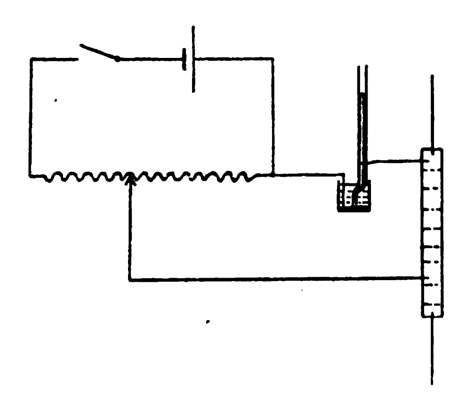


Fig. 187.

La résistance du liquide dans les siphons, les coupes et les vases poreux ne représente que le 0,001 de la résistance de la colonne en hélice et peut donc être négligée.

M. Kohlrausch a eu l'idée d'appliquer aux électrolytes la méthode du pont de Wheatstone, en plaçant dans la diagonale, où se trouve habituellement la pile, le circuit secondaire d'une bobine d'induction, dans lequel se développe une force électromotrice alternative incapable de produire l'électrolyse. Le galvanomètre est remplacé par un électrodynamomètre ; on augmente la sensibilité de celui-ci en faisant passer le courant alternatif total dans l'une des bobines, ce qui permet aussi l'interversion du sens des déviations. Lorsque l'on n'exige qu'une approximation de 2 à 3 pour 100, il est plus commode de procéder au réglage à l'aide d'un téléphone, qui rend un son aussi longtemps que le courant alternatif ne s'annule pas dans la diagonale correspondante. Il faut avoir soin de constituer les branches du pont par des conducteurs sans inductance, afin d'éviter tout accroissement apparent de leur résistance. Le mieux

est d'adopter des fils droits pour former les côtés du pont. Il faut aussi éviter toute capacité susceptible de modifier, d'une manière appréciable, l'impédance des côtés. La fig. 188 montre une disposition portative du pont de M. Kohlrausch, dans laquelle les branches de proportion sont prises sur un fil divisé B C, le long duquel glisse un contact à curseur. La branche de comparaison est une boîte de bobines à double enroulement. Le téléphone se

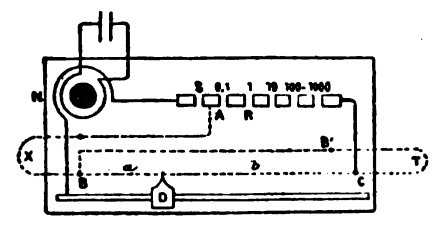


Fig. 188.

dispose en T et l'électrolyte en X. Pour les mesures approximatives, la méthode a l'avantage d'une grande rapidité; sa précision dépend de la sensibilité d'oreille de l'observateur. On reproche au procédé de M. Kohlrausch d'être affecté par la capacité de polarisation des électrodes et de mesurer l'impédance de l'électrolyte au lieu de sa résistance.

Chapitre XXIII.

RÉSISTANCE DES TERRES.

Objet de la mesure. — Le circuit d'une ligne électrique aérienne ou souterraine se complète souvent par un retour par la terre, obtenu en reliant la ligne, aux deux extrémités, soit à des plaques métalliques plongeant dans l'eau ou le sol humide, soit à des conduites d'eau ou de gaz, soit à d'autres conducteurs métalliques possédant de larges surfaces de contact avec le sol. La mesure de la résistance de ce retour présente la même difficulté que celle de la résistance des électrolytes, par suite de la polarisation que le courant d'essai occasionne aux plaques de terre. De plus, si ces plaques sont très distantes, on constate des *courants telluriques* dus à la distribution inégale des potentiels à la surface du globe, distribution qui varie incessamment et produit des variations correspondantes dans l'intensité des courants terrestres. Ces circonstances sont gênantes pour l'appréciation exacte de la résistance d'une terre.

Les meilleures terres sont ordinairement les conduites d'eau ; c'est à ces conduites qu'on se raccorde dans les laboratoires et les usines pour obtenir un potentiel sensiblement nul. Les tronçons

des conduites de gaz sont fréquemment réunis par un mastic isolant.

Cas de deux lignes parallèles. — Soient deux lignes de résistances r_1 et r_2, réunies aux mêmes plaques de terre. On détermine, par exemple à l'aide du pont de Wheatstone, la résistance totale de la ligne r_1 et du retour par la terre, en considérant comme zéro du galvanomètre la déviation causée par le courant tellurique et en adoptant une pile d'essai capable de fournir une force électromotrice très supérieure à la différence de potentiel qui produit ce courant. On a

$$R_1 = r_1 + x.$$

Une deuxième mesure faite avec la seconde ligne donne

$$R_2 = r_2 + x.$$

En bouclant les deux lignes aux extrémités, on mesure

$$R_3 = r_1 + r_2;$$

d'où

$$x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}.$$

Autre méthode. — Une autre méthode consiste à envoyer dans le circuit d'une des lignes un courant i assez intense pour qu'on puisse le mesurer par un ampèremètre et à déterminer, au moyen de l'autre ligne et d'un voltmètre, la différence de potentiel V comprise entre l'extrémité éloignée de la première ligne et la plaque de terre de la station où l'on se trouve. La résistance cherchée est

$$x = \frac{V}{i}.$$

Mesure de la résistance des terres d'un paratonnerre. — On relie un paratonnerre au sol par des plaques métalliques plongeant dans des puits distants d'au moins 10 mètres, afin d'être sûr de rencontrer une nappe souterraine d'une étendue et d'une conductibilité suffisantes. A défaut de puits, on plonge les pièces de contact, plaques, tuyaux, dans des fosses remplies de coke concassé.

Le cas échéant, on connecte le paratonnerre à des conduites souterraines d'eau ou de gaz. Voici comment on peut apprécier grossièrement la valeur relative de ces diverses terres. Appelons x, y, z, les résistances de contact de trois des prises de terre et négligeons la résistance du sol et des fils de connexion. Par l'intermédiaire de ces fils, on mesure séparément, au pont de Wheatstone ordinaire ou par la méthode de Kohlrausch,

$$R_1 = x + y,$$
$$R_2 = x + z,$$
$$R_3 = y + z;$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$$
$$y = \frac{R_1 + R_3 - R_2}{2}$$
$$z = \frac{R_2 + R_3 - R_1}{2}.$$

Chapitre XXIV.

DÉTERMINATION DES RÉSISTIBILITÉS.

Résistibilité des conducteurs. — La détermination de la résistibilité d'un conducteur est l'un des problèmes qui se posent le plus fréquemment à l'électricien, soit qu'il s'agisse d'un fil ou d'un câble aérien ou souterrain, soit de barres ou de fils utilisés à l'enroulement des électro-aimants et des dynamos.

La mesure consiste à déterminer la longueur l cm, la section s cm² et la résistance r ohms de l'échantillon fourni. La résistibilité est, en ohms-cm, à la température à laquelle on a opéré,

$$\rho = \frac{r\,s}{l}.$$

Cette expression montre que, si l'on veut connaître la résistibilité avec une erreur limite de 0,5 pour 100, les erreurs limites commises sur la résistance, le diamètre et la longueur doivent être inférieures à 0,125 pour 100, en admettant qu'on ne commette pas d'erreur dans l'évaluation de la température du fil.

Lorsque le fil à essayer est isolé, on commence par le dénuder en ayant soin de ne pas altérer sa section. Si la couverture est en coton ou en soie, on peut la dissoudre dans une solution de soude caustique.

La mesure de la longueur se fait sur le fil redressé au préalable ; il faut éviter d'étirer le fil de peur de l'écrouir. Si l'échantillon est assez long, on peut, par exemple, mesurer une longueur de quelques mètres sur un sol uni, à l'aide d'un mètre étalon, et étendre le fil suivant la direction mesurée. Si l'échantillon est court, la mesure de la longueur doit être faite avec beaucoup de précautions pour éviter une erreur relative importante ; souvent, on emploie dans ce cas, pour la détermination de la résistance du conducteur, des appareils de mesure permettant d'évaluer la résistance comprise entre des couteaux dont l'écartement est connu et sur lesquels le fil est appuyé.

Lorsque les conducteurs sont cordés, il faut mesurer la résistance d'un brin détaché du câble. Toutefois, comme le redressement de ce brin exige un étirage du conducteur, on se contente souvent d'indiquer la résistance d'une longueur donnée du câble, à une température déterminée. La résistibilité du cuivre doit être mesurée avant le câblage.

La détermination de la section moyenne du conducteur peut se faire aisément, comme on l'a vu au chap. II, si l'on connaît la densité du métal. Celle-ci s'obtient en pesant le fil dans l'air, puis dans l'eau bouillie, en évitant les bulles adhérentes. De la masse du fil, de sa longueur et de sa densité, on déduit sa section moyenne.

Un autre procédé pour déterminer le diamètre moyen de la section consiste à employer une jauge, mais ce moyen est très grossier dans le cas de fils minces.

La mesure de la résistance peut être effectuée au pont de Wheatstone, au double pont de Kelvin ou par des méthodes analogues, suivant qu'on a affaire à une résistance moyenne ou à une résistance faible.

Pour connaître la résistibilité à 0° C, il faut faire la correction relative à l'échauffement, ce qui exige la connaissance de la température du fil pendant la mesure et du coefficient de variation de la résistance. On laisse le fil pendant plusieurs heures dans un local à température constante avant de mesurer sa résistance. On a soin de ne pas toucher le fil avec les doigts pendant les manipulations, pour ne pas l'échauffer. On le manie, par exemple, avec

des pinces en bois. La formule de correction utilisée dans les limites de température ordinaires est de la forme

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

Les résistances de comparaison ne nécessitent pas de correction pour la température si elles sont en manganine ou en un alliage analogue.

Afin d'éviter la correction de température dans la mesure de la résistibilité du cuivre, on adopte souvent, comme étalon de comparaison, un fil de cuivre de résistance connue, qu'on laisse dans le même endroit que le fil essayé, afin d'obtenir l'équilibre de température. Pour faire la mesure, il suffit, par exemple, d'envoyer un courant faible dans les deux fils reliés en série et de comparer les différences de potentiel aux extrémités de ceux-ci, au moyen d'un galvanomètre sensible de grande résistance.

Soient V et V′ les tensions correspondant aux deux fils,
r et r' les résistances,
ρ et ρ' les résistibilités,
l et l' les longueurs,
s et s' les sections ;
on a, pour un courant i,

$$\rho = \frac{V}{i}\frac{s}{l},$$

$$\rho' = \frac{V'}{i}\frac{s'}{l'}.$$

On en tire

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{V}{V'}\frac{s}{s'}\frac{l'}{l}.$$

Si l'on relève la tension sur les deux fils à l'aide de deux couteaux, séparés par un manche isolant, qu'on appuie sur les conducteurs, on a

$$l = l',$$

et

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{Vs}{V's'} = \frac{\alpha}{\alpha'}\frac{s}{s'},$$

α et α' désignant les lectures au galvanomètre supposé proportionnel.

Les praticiens ont conservé l'habitude de spécifier la conductibilité des fils par comparaison avec celle d'un cuivre spécial étalonné par Matthiessen et considéré longtemps comme pur. Ce cuivre mesure 1,584 microhm-cm à 0°C, lorsqu'il est recuit. Actuellement, le commerce peut livrer du cuivre ayant une conductibilité de 102 et 103 pour 100 de celle du cuivre Matthiessen, ce qui montre l'inconvénient de ce mode de comparaison.

Résistibilité des électrolytes. — La mesure de la résistance d'un électrolyte de dimensions déterminées s'opère par l'une des méthodes exposées au chap. XXII. Si l'électrolyte présente une section constante s et une longueur l, sa résistibilité est, comme dans le cas précédent,

$$\rho = r\frac{s}{l}.$$

La température a une importance considérable, eu égard à la grande variation de la résistance des électrolytes avec cet élément. La formule appliquée par M. Bouty aux solutions salines étendues est

$$R_0 = R_t\,(1 + 0{,}0337\,t).$$

Résistibilité des diélectriques. — La résistibilité du diélectrique des câbles étant très élevée s'estime ordinairement d'après la valeur de la résistance à l'isolement d'un long fil couvert du diélectrique sous une épaisseur connue. On verra, au chap. XXV, avec quelles précautions doit s'exécuter la mesure. Si R mégohms est la résistance à l'isolement trouvée pour un fil de longueur l cm, dont l'enveloppe a un diamètre extérieur D cm et dont le diamètre du conducteur est d cm, la résistibilité du diélectrique est, en mégohms-cm,

$$\rho = \frac{2{,}728\,R\,l}{\operatorname{Log}\frac{D}{d}}.$$

On peut estimer la résistibilité d'un diélectrique en feuille mince par le procédé suivant. L'épaisseur du diélectrique ayant été calibrée, l'on applique sur les deux faces des disques laissant déborder une large bande d'isolant pour réduire les dérivations

superficielles. Le disque supérieur est chargé d'un poids suffisant pour assurer l'adhérence avec le diélectrique. Celui-ci est alors soumis à une différence de potentiel élevée, qu'on obtient dans les laboratoires d'étalonnage par des batteries de petits éléments secondaires au nombre de plusieurs milliers. On mesure simultanément, avec un électromètre et avec un galvanomètre très sensible, la différence de potentiel et le courant entre les disques. Une vérification préalable sera faite pour constater s'il n'y a pas une rupture du diélectrique pouvant compromettre le galvanomètre pendant la mesure.

On note soigneusement la température et la durée d'électrisation du diélectrique. Dans une telle mesure, de grandes précautions doivent être prises pour empêcher les dérivations de courant par les bords du disque isolant. Pour éviter l'humidité, celui-ci peut être disposé sous une cloche contenant des matières desséchantes. Une bonne précaution est d'entourer le disque métallique relié au galvanomètre d'un anneau de garde reposant sur le diélectrique et communiquant directement avec le pôle de la pile relié au galvanomètre. Ainsi, le courant qui franchit le bord de la feuille isolante ne traverse pas l'instrument.

L'influence de la température est plus grande encore pour les isolants que pour les électrolytes. La formule de correction est exponentielle. Pour la gutta-percha, on a

$$R_t = R_0 \times 0{,}894^t,$$

entre 0° et 38° C.

La résistibilité de la gutta-percha étant représentée par 100 à 0°C après 1 minute d'électrisation, monte à 318 après 90 minutes. A 24° C, la variation n'est que de 5,5 à 7,66 dans les mêmes conditions de temps.

Ces observations montrent qu'il est impossible d'atteindre une grande précision dans la mesure de la résistibilité des isolants, laquelle est fonction de la durée de passage du courant et, en outre, de la différence de potentiel appliquée. En forçant suffisamment celle-ci, on produit un courant intense sous forme de décharge disruptive.

Chapitre XXV.

ESSAIS GÉNÉRAUX DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

Détermination de la résistance d'un câble électrique à l'usine. — Les cahiers des charges relatifs aux câbles électriques spécifient la résistance kilométrique du conducteur à une température donnée. Si le câble est recouvert d'une gaîne imperméable, l'essai se fait après en avoir immergé une longueur connue dans une cuve dont on maintient l'eau à une température constante pendant 24 heures, afin que l'équilibre de température s'établisse à travers la gaîne mauvaise conductrice. La mesure s'effectue au pont de Wheatstone, par exemple, et l'on a soin de déterminer la résistance des fils de connexion avant et après l'expérience, afin de déduire la moyenne trouvée de la résistance totale obtenue. Il y a lieu de faire les corrections pour la température, pour ramener le résultat à la température indiquée au cahier des charges.

Détermination de la résistance d'une canalisation posée. — Deux cas se présentent :

a) il existe plusieurs conducteurs entre les points extrêmes ;

b) il n'y a qu'un seul conducteur et le retour se fait par le sol, ce qui est le cas des longues lignes sous-marines.

Cas de plusieurs lignes. On établit un circuit métallique en bouclant deux des conducteurs à l'un des postes extrêmes et l'on détermine la résistance de ce circuit en connectant les deux bouts disponibles aux appareils de mesure par des fils de jonction, dont la résistance doit être déduite du résultat trouvé.

Si l'on dispose de trois lignes, on peut faire trois combinaisons de ce genre, dont les résultats permettent de déterminer séparément la résistance de chacune des lignes.

Un tel essai est forcément moins précis que l'essai des câbles à l'usine ; on ne peut, en effet, faire la correction pour la température, attendu que celle-ci n'est pas connue. On a précisément recours à un essai de la ligne posée pour déterminer la température moyenne du câble, essayé au préalable à l'usine ; l'on applique la formule

$$R_t = R_{t'} \left\{ 1 + \alpha (t - t') \right\},$$

dans laquelle t' est la seule inconnue. La connaissance de cette température moyenne permet de faire la correction relative à la résistance d'isolement du câble, résistance qui varie beaucoup plus que celle du conducteur avec la température.

Cas d'une ligne unique. Dans le cas où l'on ne dispose que d'une ligne unique entre les deux postes extrêmes, il est nécessaire de compléter le circuit par la terre, la ligne étant reliée d'une part aux appareils de mesure, d'autre part au sol. On fait ainsi intervenir dans le résultat la résistance du retour par la terre, qui est peu importante si la ligne est longue.

Supposons que l'essai s'opère au moyen du pont de Wheatstone, qui est l'appareil le plus employé pour ce genre de mesures. Une difficulté surgit du fait des courants telluriques produits par des différences de potentiel existant entre les divers points de la terre. Les forces électromotrices qui donnent naissance à ces courants ne dépassent généralement pas quelques volts et elles ne varient que très lentement, sauf au moment des orages magnétiques, où elles peuvent atteindre des centaines de volts et varier très rapidement. Il y a aussi des forces électromotrices dues à la polarisation des plaques de terre, mais elles sont inférieures à 1 volt.

Pour éliminer ces effets perturbateurs, on traite la ligne comme une résistance contenant une force électromotrice en appliquant une méthode d'essai analogue à celle de Mance décrite plus loin et qu'on désigne sous le nom de *méthode du faux zéro*. On considère la déviation du galvanomètre, occasionnée par le courant tellurique avant l'abaissement de la clef de la pile, comme le zéro de l'échelle et l'on règle les branches du pont de manière à maintenir l'index dans cette position. Il est bon d'employer une pile assez forte, de 50 à 100 éléments Daniell par exemple, afin de rendre minimum l'effet relatif du courant tellurique. On n'abaisse la clef du galvanomètre que 10 à 20 secondes après la clef de la pile, pour éviter l'influence sur l'instrument du courant de charge du câble.

Pour plus d'exactitude, on répète l'essai après avoir renversé le courant de la pile d'essai, ce qui intervertit le sens du courant dans la ligne, et l'on prend la moyenne des résultats.

Un moyen de neutraliser les forces électromotrices de la ligne consiste à intercaler dans celle-ci quelques éléments de pile, dont on fait varier la tension aux bornes, à l'aide d'un rhéostat en dérivation, de manière à introduire dans la ligne une différence de potentiel égale et opposée aux forces électromotrices perturbatrices. On vérifie si le résultat est atteint à l'aide du galvanomètre, dont l'aiguille doit rester au zéro avant l'abaissement de la clef d'inversion disposée à la suite de la pile d'essai du pont.

Isolement des lignes aériennes. — On définit, sous le nom de résistance à l'isolement d'une canalisation, la résistance mesurée entre le conducteur et la terre. Elle est en raison inverse de la longueur de la ligne ; il s'ensuit que, pour conserver un taux de perte constant, l'isolement par unité de longueur doit croître avec l'étendue de la canalisation.

L'isolement des canalisations aériennes ou souterraines à conducteurs nus varie beaucoup avec l'état hygrométrique de l'air, à cause de la buée qui se dépose en quantité plus ou moins considérable sur les isolateurs. Dans une atmosphère très humide, l'isolement tombe souvent en dessous de 1 mégohm par kilomètre.

La mesure de l'isolement s'opère par l'une des méthodes employées pour l'évaluation des grandes résistances. Si l'isolement est très élevé, on adopte la méthode de déviation, en observant

la déviation occasionnée par le courant de perte dans un galvanomètre, sensible et gradué au préalable, qu'on intercale entre la pile d'essai et l'une des extrémités de la ligne, celle-ci étant isolée à l'autre extrémité.

Lorsque la résistance d'isolement n'est pas très élevée, la mesure peut se faire simplement à l'aide du pont de Wheatstone.

Isolement des isolateurs. — La réception des isolateurs comporte la vérification de leur isolement. A cet effet, les isolateurs à cloche sont renversés dans une cuve contenant de l'eau jusqu'à 2 cm environ du bord des cloches ; de l'eau est également versée dans les cloches jusqu'au même niveau. On laisse les isolateurs dans cet état pendant 24 heures, afin de donner au liquide le temps d'imbiber les fissures que la porcelaine peut éventuellement présenter. On sèche alors les bords des isolateurs en promenant à proximité de leur surface un fer rouge ou une rampe à gaz ; puis on mesure l'isolement en reliant les deux pôles d'une pile de 100 volts, l'un à l'eau de la cuve par une plaque baignant dans celle-ci, l'autre à l'eau qui remplit l'intérieur des cloches, un galvanomètre étalonné étant intercalé dans le circuit. Pour opérer rapidement, on tient la seconde électrode par un long manche en ébonite pour la plonger successivement dans chaque isolateur. Lorsque la déviation du galvanomètre dépasse celle qui correspond à l'isolement minimum exigé, 1 000 mégohms par exemple, on rebute l'isolateur défectueux.

Il y a une tendance à substituer à l'essai précédent un simple essai du pouvoir diélectrique des isolateurs qu'on soumet à une tension de plusieurs milliers de volts, grâce à un transformateur à courants alternatifs. Au moment de l'application de cette tension à l'isolateur immergé, la buée qui recouvre les bords de la porcelaine est volatilisée. Si la cloche présente une gerçure, le courant primaire atteint une intensité suffisante pour fondre le fil de sûreté intercalé dans le circuit inducteur.

Il faut remarquer que le pouvoir diélectrique pour les tensions élevées n'est pas directement lié à la résistance d'isolement mesurée avec des différences de potentiel faibles. C'est ainsi que l'air qui, à la température ordinaire, est un isolant pratiquement parfait

pour la décharge conductive, résiste très mal à la décharge disruptive, la distance explosive croissant plus vite que les différences de potentiel appliquées.

Il est logique de contrôler le pouvoir diélectrique des isolateurs qui ont à résister aux tensions élevées qu'occasionnent les décharges atmosphériques ainsi que certains effets de réactance.

Pour ces essais, on utilise des transformateurs à noyau droit et à voltage secondaire variable soit par déplacement du noyau, soit par réglage du courant primaire à l'aide d'un rhéostat. Aux bornes secondaires sont raccordées des pointes dont l'écartement, réglé par une vis micrométrique, limite la tension. Un électromètre indique cette dernière. La différence de potentiel secondaire est appliquée pendant une minute au moins.

Voici, d'après M. Steinmetz, pour différents isolants, la distance explosive d, en centièmes de millimètre, la tension E étant exprimée en kilovolts.

Air	$d = 36\,(e^{-1,3\,E} - 1) + 54\,E + 1,2\,E^2$
Mica	$d = 0,24\,E + 0,014\,E^2$
Papier paraffiné	$d = 3\,E$
Fibre	$d = 7,65\,E$
Paraffine fondue / Huile de lin cuite	$d = 12,4\,E$

Isolement des câbles recouverts de gutta-percha. — L'isolement des câbles télégraphiques souterrains et sous-marins, isolés à la gutta-percha, doit être déterminé méticuleusement, pour éviter les grandes dépenses qu'occasionnent les réparations des lignes défectueuses.

Les âmes, composées de conducteurs en cuivre recouverts de gomme isolante, sont fabriquées par bouts de 500 m à 3 000 m. L'essai à l'usine n'a lieu qu'une quinzaine de jours après la fabrication, afin de laisser à la gutta-percha, dont la résistibilité a diminué pendant le travail, le temps de reprendre ses qualités. Les bouts à essayer sont lovés dans des cuves qu'on remplit d'eau maintenue, par des jets de vapeur, à une température de 24° C pendant 24 heures. Il faut ce temps pour assurer l'établissement de l'équilibre de température à travers l'enveloppe mauvaise conductrice de la chaleur.

La mesure de l'isolement s'effectue par la méthode et sous la tension spécifiées au cahier des charges, les résultats obtenus variant avec les conditions d'expérience. Une force électromotrice assez grande est nécessaire pour déceler les gerçures, qui ne se manifesteraient pas avec une tension réduite, et pour rendre négligeables les effets de polarisation. Généralement, on procède à l'essai par la méthode de déviation, en employant une pile de 100 éléments au sulfate de cuivre. On commence par étalonner le galvanomètre convenablement shunté, en s'aidant d'un seul élément et d'une boîte de résistance de 10 000 à 100 000 ohms. On détermine d'ailleurs le rapport de la force électromotrice de cet élément à celle de la pile entière d'après les élongations qu'accuse un galvanomètre balistique, quand on y décharge un condensateur chargé successivement à l'aide de ces deux forces électromotrices. Les élongations sont rendues comparables par l'emploi de shunts ; on a soin de faire la correction que ceux-ci nécessitent (chap. VI).

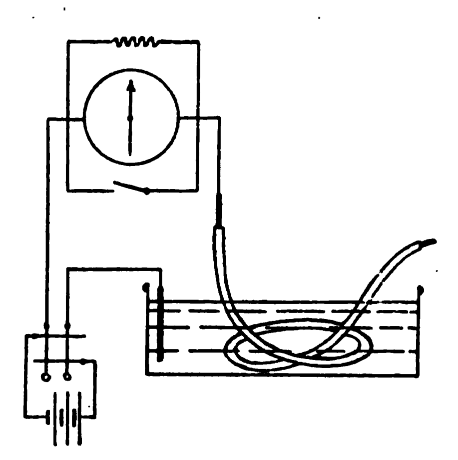


Fig. 189.

On connecte ensuite l'un des pôles de la grande pile à l'eau de la cuve, par l'intermédiaire d'une clef d'inversion, tandis que l'autre pôle est relié au câble, à travers le galvanomètre protégé par une clef de court-circuit, qui permet d'éviter le passage dans l'appareil du courant de charge initial.

Le plus grand soin doit être apporté à l'isolement des instru-

ments, des piles et des fils de connexion. Les clefs et les bornes d'attache doivent être montées sur des colonnes en ébonite. L'isolement des fils de connexion est vérifié par une mesure préalable et l'on corrige, s'il y a lieu, dans l'essai définitif, l'erreur que leur emploi entraîne. Il faut éviter qu'il puisse se produire des déperditions de courant par une couche d'humidité qui ferait éventuellement communiquer les bouts dénudés du câble avec l'eau de la cuve. On rafraîchit ces bouts en taillant la gutta-percha à l'aide d'un canif et en les enduisant de paraffine. On peut aussi enrouler autour des extrémités de la gaîne isolante un fil métallique qui est relié, d'autre part, à la borne du galvanomètre en contact avec la pile. Ainsi, le courant dérivé par la couche superficielle de l'isolant ne passe pas dans le galvanomètre.

Il convient de disposer le galvanomètre comme la fig. 189 l'indique et de ne pas intercaler cet appareil entre la clef d'inversion et la cuve, car les piles n'étant jamais parfaitement isolées, le courant de perte des éléments augmenterait la déviation de l'instrument.

Après avoir maintenu la clef d'inversion abaissée pendant 10 à 20 secondes, on ouvre la clef de court-circuit. Le shunt est réglé de manière à obtenir une déviation convenable. On note la lecture après 1 ou 2 minutes. Ce sont là les durées d'électrisation le plus souvent indiquées dans les cahiers des charges. Si l'on prolonge l'expérience, on constate que la déviation du galvanomètre va en décroissant de moins en moins vite jusqu'à une valeur fixe. On ferme ensuite la clef de court-circuit et relève la clef d'inversion de manière à laisser le câble se décharger, après quoi on recommence l'essai en renversant le sens du courant : on adopte la moyenne des lectures. Les déviations servant au calcul de la résistance d'isolement sont celles observées après 1 ou 2 minutes d'électrisation. On apporte les corrections pour la température en s'aidant de la formule donnée au chap. XXIV.

Si l'on recommençait la mesure par d'autres méthodes, telles que celle de la perte de charge, on trouverait d'autres résultats différant de plusieurs centièmes, car les isolants donnent lieu à des phénomènes d'hystérésis diélectrique que ne présentent pas les conducteurs ; ce qui fait que la mesure de la résistance des premiers n'est pas susceptible d'une grande précision. C'est pourquoi il

faut avoir soin d'indiquer, en même temps que le résultat, la méthode employée et les conditions d'expérience.

La détermination de l'isolement d'un câble posé s'effectue par un procédé semblable au précédent, mais cet essai est moins précis encore, par suite de l'impossibilité de mesurer la température moyenne du câble. On peut calculer cette température en comparant la résistance du conducteur après la pose à sa résistance mesurée à l'usine, à une température connue.

Isolement des joints des câbles isolés à la gutta-percha. — La résistance d'isolement d'un joint ordinaire se rapproche de 10^6 mégohms, en sorte que la vérification de cet isolement exige des méthodes de mesure spéciales. Le plus souvent, les cahiers des charges spécifient que l'isolement d'un joint doit être équivalent à celui de 2 m de câble et que la comparaison doit être faite, par la méthode d'*accumulation*, avec une pile de 200 éléments au sulfate de cuivre.

Les deux rouleaux de câble réunis sont isolés et la jonction est plongée dans une cuve suspendue à des lanières en caoutchouc, afin d'assurer son isolement. Le circuit comprend la pile d'essai, une clef d'inversion, un condensateur, le conducteur du câble et

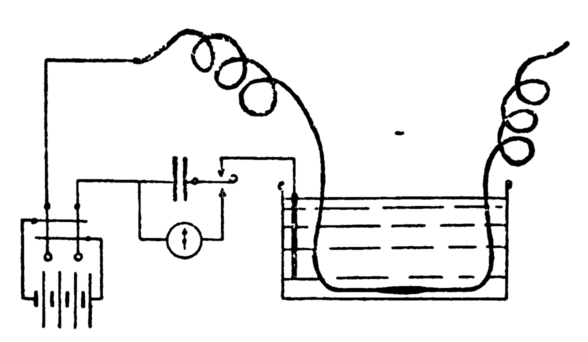


Fig. 190.

l'eau de la cuve, dans laquelle plonge une électrode métallique. Le condensateur peut ainsi se charger de la quantité d'électricité qui passe à travers le joint. L'effet de sa décharge dans le galvanomètre

après une ou deux minutes d'électrisation est comparé à celui de 2 m de câble, dans les mêmes conditions.

On vérifie si le circuit est bien isolé en abandonnant le condensateur chargé pendant 3 ou 4 minutes, la clef de décharge étant dans la position d'isolement et la clef d'inversion relevée. Il faut que l'élongation obtenue après ce temps ne diffère pas sensiblement de l'élongation due à une décharge immédiate.

L'essai des joints peut également se faire par la méthode de perte de charge (chap. XIII), mais dans ce cas l'isolement du condensateur doit être très supérieur à celui du joint, condition difficile à réaliser.

Isolement des câbles industriels. — L'isolement exigé pour les câbles électriques industriels, pourvus d'une gaîne imperméable, est généralement très élevé. L'isolement kilométrique minimum doit atteindre plusieurs centaines de mégohms et l'on demande une résistance additionnelle, proportionnelle à la tension de service, d'au moins 25 mégohms par 100 volts, pour les applications utilisant des tensions considérables. Au premier abord, on ne conçoit pas la nécessité d'un isolement aussi grand, car la puissance perdue de ce chef pourrait devenir beaucoup plus forte sans cesser de représenter une très petite fraction de celle dissipée par l'effet Joule dans le conducteur. On a fréquemment exprimé l'opinion qu'un isolement kilométrique d'un mégohm suffirait largement. Mais la difficulté est de maintenir un tel isolement, les substances qui le procurent ne résistant pas en général à l'électrolyse. On est obligé de recourir à des corps, tels que le caoutchouc, le papier, le jute, qui, même sous une faible épaisseur, possèdent un pouvoir isolant considérable.

La mesure de l'isolement des câbles de ce genre se fait par des méthodes analogues à celles employées pour les câbles recouverts de gutta-percha. Les câbles imperméables doivent être essayés sous l'eau, de même que les câbles pourvus d'une gaîne de plomb, afin de vérifier l'étanchéité de celle-ci.

Souvent les câbles industriels ont à résister a des tensions alternatives élevées et doivent être essayés sous une force électromotrice variant du simple au double de celle de service, pendant un temps

qui ne peut être inférieur à 1 minute. L'essai se fait comme pour les isolateurs (voir plus haut).

On étudiera au chap. XXVII les méthodes propres à vérifier l'isolement des réseaux électriques.

Capacité des canalisations. — La capacité des canalisations aériennes est minime. Elle est voisine de 0,01 microfarad par kilomètre pour un fil de cuivre de 3 mm de diamètre suspendu à 5 m au dessus du sol, ce dernier servant au retour du courant. Elle peut être mesurée par la méthode des comparaisons successives.

La capacité des câbles, particulièrement de ceux qui servent à la télégraphie, atteint près de 0,2 microfarad par kilomètre. La mesure peut se faire également par la méthode des comparaisons successives dans le cas de câbles courts; mais avec les longs câbles, il est nécessaire de recourir à une méthode de zéro, telle que celle de Lord Kelvin, afin d'éliminer, autant que possible, les erreurs qu'entraîne la différence entre les durées de la charge du câble et de celle d'un condensateur étalon. Des précautions du genre de celles que nous avons indiquées au sujet des essais d'isolement doivent être prises dans ce cas. La charge du câble s'opère ordinairement pendant une minute, avec une pile d'une centaine d'éléments au sulfate de cuivre. Une correction est nécessaire pour tenir compte de la capacité des connexions. La correction pour la température est très peu importante avec la gutta-percha.

Lorsqu'on essaie la capacité d'un câble posé, les courants telluriques troublent parfois les mesures. On laisse alors le câble se charger d'abord sous l'influence du courant terrestre, puis on observe au galvanomètre la charge supplémentaire due à la pile d'essai. C'est l'élongation occasionnée par cette surcharge qu'on compare à celle que produit le condensateur étalon.

Un cas intéressant se présente dans les câbles industriels qui renferment souvent deux conducteurs concentriques protégés par une armature commune. Si l'on cherche la capacité du conducteur intérieur par rapport à l'armature, on rencontre le cas de deux condensateurs en série, le conducteur extérieur constituant une armature commune aux deux condensateurs. La capacité résultante est donc l'inverse de la somme des inverses des capacités des condensateurs composants.

Si l'on charge le condensateur intérieur seul, en mettant les deux conducteurs concentriques en relation avec un générateur d'électricité, l'armature étant à la terre, le condensateur extérieur ne se charge pas et, par suite, le conducteur extérieur prend le même potentiel que l'armature.

C'est pourquoi avec les câbles concentriques ce conducteur est souvent relié directement au sol. C'est également pour cette raison qu'il convient de relier au câble extérieur tous les appareils, tels que ampèremètres, compteurs, etc., afin d'amoindrir le danger des manipulations.

Coefficients d'induction des canalisations électriques. — La réactance des circuits tient à leur capacité et à leur inductance. Dans les câbles sous-marins et souterrains, le premier élément est de beaucoup le plus important, mais dans les lignes aériennes le second joue un rôle sérieux, qui rend nécessaire la détermination des coefficients d'induction.

Le coefficient d'induction mutuelle de deux lignes peut s'estimer par comparaison avec une capacité, en ayant recours à la méthode de MM. Vaschy et de la Touanne, par exemple. Cet essai exige des corrections pour tenir compte de la capacité relative des deux lignes. Dans le cas où la terre fait partie du circuit, il faut, en outre, éliminer les courants telluriques, qui peuvent être neutralisés par une pile shuntée, comme on l'a vu à propos de l'essai de résistance des câbles.

Le coefficient de self-induction d'une ligne aérienne se détermine ordinairement par l'une des méthodes de comparaison avec la capacité d'un condensateur.

Ici encore la capacité de la ligne intervient; voici comment on peut en tenir compte. On sait qu'une capacité C dérivée sur une résistance r joue le rôle d'une self-induction négative égale à $-Cr^2$. Supposons que la ligne de longueur l présente une self-induction $\mathfrak{L}$, une résistance R et une capacité c par unité de longueur. Si, à une distance x de l'extrémité reliée à la terre, nous considérons un condensateur de capacité cdx, dérivé par rapport au sol, la self-induction $\mathfrak{L}l$ est diminuée d'une quantité $cdx \times R^2x^2$.

Il s'ensuit que la self-induction apparente de la ligne entière est

$$\mathfrak{L}l - \int_0^l cdx\, R^2 x^2 = \mathfrak{L}l - \frac{c\, R^2\, l^3}{3}.$$

C'est cette expression qu'il faut introduire dans le calcul des résultats de la mesure.

Si l'on a affaire à une ligne double, c exprime la capacité relative des deux fils par cm.

La charge due à la capacité de la ligne diffère avec la répartition des potentiels le long des deux fils. Si les extrémités bouclées sont réunies à la terre, l'une des lignes prend une charge positive et l'autre une charge négative égale qui neutralise la première lors de la décharge. On ramène le cas de deux conducteurs au cas précédemment étudié en mettant à la terre, non la boucle, mais l'une des extrémités libres : la charge est alors tout entière positive ou négative.

Chapitre XXVI.

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

Essais périodiques. Méthode par courants reçus. — Les lignes télégraphiques, spécialement les lignes souterraines et sous-marines, doivent être l'objet d'essais périodiques qui ont pour but, d'une part, de vérifier l'état des lignes, d'autre part, de recueillir les données nécessaires pour localiser aisément, le cas échéant, la position des dérangements.

Ces essais consistent à déterminer la résistance électrique des lignes et la résistance d'isolement. Les résultats trouvés sont consignés dans des tableaux indiquant la date des essais et les circonstances dans lesquelles ceux-ci ont été faits ; pour les lignes aériennes, il convient, par exemple, de renseigner l'état atmosphérique (brouillard, pluie, neige, ciel serein), l'humidité de l'air ayant une grande influence sur la résistance d'isolement.

Voici un moyen simple pour l'essai journalier des lignes télégraphiques d'un pays. Tous les postes dont les lignes convergent vers un bureau principal envoient, à des moments déterminés et différant entr'eux de quelques minutes, un courant continu vers le poste central, à l'aide de leur manipulateur et de leur pile de travail. Ces courants y sont reçus successivement dans un

galvanomètre étalonné et leurs intensités sont notées. Si un courant n'a pas son intensité normale, on procède, après la série des mesures, à des essais spéciaux, afin de vérifier si l'insuffisance est due à un défaut d'isolement de la ligne, à la fatigue de la pile du poste de transmission ou à d'autres causes. Pour vérifier l'état d'une pile, il suffit de mesurer la force électromotrice de ses éléments à l'aide d'un voltmètre approprié.

Ces essais journaliers sont excellents pour contrôler la décroissance graduelle des courants et juger du moment où il convient de procéder à l'entretien des lignes et des piles.

Dérangements des lignes télégraphiques. — Les dérangements des lignes télégraphiques peuvent être rangés dans les 3 classes suivantes :

1. *Communication accidentelle de la ligne avec la terre.* Ce dérangement se produit, par exemple, lorsqu'un fil se rompt et qu'un des bouts libres tombe sur le sol, ou bien lorsque le fil est touché par une branche d'arbre, ou encore, dans le cas d'un câble, lorsque l'enveloppe isolante est perforée.

2. *Communication entre deux fils voisins.* Cette communication résulte soit du bris d'un fil aérien dont les tronçons viennent toucher les fils voisins, soit du mélange des fils ballottés par le vent ; la liaison peut aussi être établie par un objet intermédiaire.

3. *Interruption de la ligne.* Ce dérangement n'est guère à considérer que dans les câbles souterrains ou sous-marins, dont le conducteur peut être rompu, tout en restant isolé par son enveloppe de gutta-percha. Dans les lignes aériennes, un fil brisé tombe à terre ou sur un autre fil et le dérangement rentre dans l'un des cas énoncés ci-dessus.

Lorsqu'un défaut se produit, on commence par le localiser entre deux postes, puis, dans le cas d'une ligne aérienne, on envoie le long de celle-ci un poseur qui relève la faute et la répare. Cette visite peut se faire très rapidement lorsque la ligne longe un chemin de fer : l'agent, placé dans le fourgon d'un train, suit des yeux le fil qui lui a été indiqué.

Mais s'il s'agit d'un câble souterrain ou sous-marin, ou encore d'une très longue ligne aérienne, il faut recourir à des essais électriques pour déterminer l'endroit où existe le dérangement. On fait un essai préliminaire permettant de déceler la nature de celui-ci. Pour cela, l'on envoie le courant d'une pile sur la ligne, à travers un galvanomètre. La résistance normale de la ligne étant connue par les essais périodiques, si la déviation indique une intensité plus grande que celle déduite de la loi d'Ohm, il y a une perte en un point de la ligne ; si la déviation est très faible, il y a interruption ; enfin, si le courant est reçu par un fil voisin, il y a contact entre deux fils.

Connaissant la nature du dérangement, on procède à la localisation de ce dernier. Considérons d'abord le cas du contact d'un fil avec la terre ou avec un autre fil. On détermine la résistance x de la section de ligne comprise entre le poste où l'on se trouve et le contact. Il est clair que si r représente la résistance kilométrique du fil, le rapport $\frac{x}{r}$ mesure, en kilomètres, la distance du défaut au poste d'observation. Dans la recherche de la position d'une faute sur un câble sous-marin, on tiendra compte du mou du câble.

Perte en un point de la ligne. — Supposons qu'une ligne sous-marine soit parfaitement isolée, sauf en un point où le diélectrique est percé. Soient x et y les résistances des deux tronçons séparés par le défaut. Leur somme est connue par les essais périodiques.

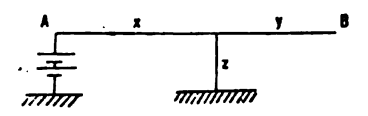


Fig. 191.

Appelons z la résistance de la faute. En déterminant au poste A la résistance de la ligne lorsqu'on met à la terre et isole successivement l'extrémité B, on relève des valeurs permettant de déterminer x, y et z. Toutefois, certaines circonstances rendent souvent cet essai très difficile.

En premier lieu, une ligne n'est jamais parfaitement isolée. Si la résistance d'isolement est de l'ordre de celle du défaut, on peut

considérer la première comme due à une faute permanente située au milieu de la ligne. Le défaut localisé par l'essai est alors un défaut résultant fictif, ayant son point d'application entre la faute réelle et la faute due à l'isolement imparfait. Connaissant le siége de cette dernière et sa grandeur par les essais périodiques, ainsi que la position et l'importance de la faute résultante, on peut, en raisonnant comme dans le cas de la composition de forces parallèles, trouver la grandeur et le point d'application du défaut cherché. Ce calcul constitue la correction de Taylor.

On peut d'ailleurs trouver plus simplement le résultat en appliquant les lois de Kirchhoff aux résistances combinées qu'on mesure dans ce cas. Comme il n'y a que les trois inconnues x, y et z, les essais fournissent suffisamment d'équations pour les calculer.

Mais le problème est indéterminé s'il existe sur une ligne simultanément plusieurs défauts, dont les positions ainsi que les grandeurs sont inconnues, attendu qu'une infinité de combinaisons peuvent fournir les résistances résultantes qu'on mesure de l'un des bouts. C'est pourquoi il est si important de procéder à des essais périodiques, particulièrement sur les lignes sous-marines dont les réparations entraînent parfois des frais énormes. On peut ainsi localiser les défauts à mesure qu'ils se produisent.

Le problème se complique d'ailleurs par le fait que la résistance des fautes est variable. Considérons le cas le plus simple d'un défaut unique constitué par une fissure dans la gaîne de gutta-percha. La résistance du défaut comporte celle du liquide qui remplit la fissure et devant laquelle la résistance du retour par la mer peut être négligée, ainsi que la résistance de contact de l'eau avec le conducteur; cette dernière dépend de la nature des dépôts que l'électrolyse produit sur celui-ci. Si l'on envoie par l'un des bouts du câble, isolé à l'autre bout, un courant qui rend le conducteur positif par rapport à l'eau de la mer, le cuivre se couvre d'une couche d'oxychlorure qui accroît progressivement la résistance du défaut. En envoyant ensuite un courant de sens inverse, le dépôt se réduit par l'hydrogène et les alcalis provenant de la décomposition de l'eau salée. Lorsque le dépôt est entièrement réduit, la résistance de la faute ne dépend plus que du liquide qui remplit la fissure de la gaîne isolante et elle passe

par un minimum qui est de courte durée, car l'hydrogène qui se dégage ensuite par bulles et la soude qui environne le métal rendent la résistance du défaut très variable. C'est ce minimum qu'il faut essayer de saisir. Dans ce but, M. Lumsden conseille d'envoyer au préalable un courant réducteur, à l'aide d'une pile énergique, pendant 10 à 12 heures, pour nettoyer le conducteur. On renverse le sens du courant de temps en temps pendant quelques minutes afin de détruire la soude formée et de précipiter le cuivre qui s'est dissous ; ce traitement procure une surface rugueuse favorable au dégagement de l'hydrogène. Le conducteur est ensuite recouvert d'une couche d'oxychlorure de cuivre par un courant oxydant de 20 à 30 milli-ampères appliqué durant une minute environ. On mesure alors la résistance à l'aide du pont de Wheatstone et avec un courant réducteur. La résistance va en décroissant ; on suit ses variations par un réglage continu du pont. A un moment donné, la résistance s'élève brusquement, par suite du dégagement de l'hydrogène ; on adopte la valeur minima trouvée.

M. Kennely a indiqué une formule empirique permettant de déterminer la résistance d'une faute. Pour des courants inférieurs à 25 milli-ampères, la résistance du défaut peut être représentée par

$$r = \frac{K}{\sqrt{i}}.$$

On verra plus loin le parti qu'on peut tirer de cette formule.

Enfin, une dernière cause d'erreur dans les mesures qui nous occupent est due aux courants telluriques et de polarisation que nous avons déjà rencontrés dans la mesure de la résistance des lignes. A ces courants s'ajoute, dans le cas des câbles sous-marins, le courant que produit la pile constituée à l'endroit du défaut par le cuivre à nu, le fer de l'armature et l'eau de la mer. Cette pile dont le cuivre est le pôle positif, détermine dans le conducteur un courant allant de la faute vers les extrémités reliées à la terre. On élimine ces influences, soit en adoptant la méthode du faux zéro dans la mesure de la résistance, soit en neutralisant les courants parasites au moyen d'une pile intercalée dans la ligne et shuntée convenablement.

Méthode de Blavier. — Supposons qu'un câble présente une perte unique et constitue la seule communication disponible entre les postes qu'il relie.

On établit les connexions indiquées dans la fig. 192 et l'on mesure la résistance du câble d'abord isolé au bout extrême, puis relié à la terre, en observant les précautions indiquées dans le paragraphe précédent. Une pile shuntée *p* sert à neutraliser les courants

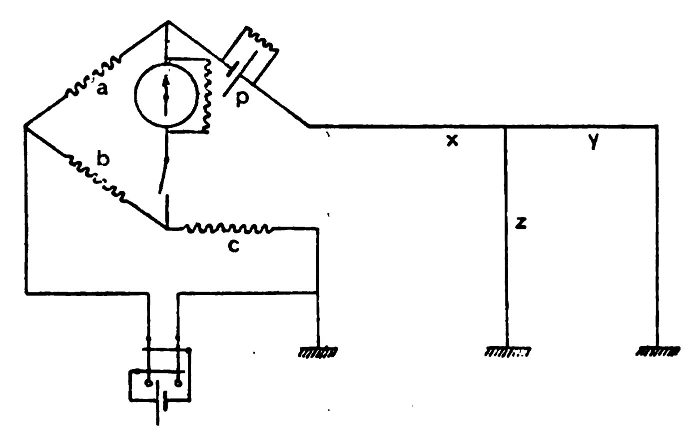


Fig. 192.

parasites dont le câble est le siége. Le galvanomètre n'est relié au circuit que lorsque le courant de charge a pris fin. On emploie un appareil Deprez et d'Arsonval, afin de pouvoir procéder rapidement. Soient r_1, r_2, r_3 les résistances du conducteur, du câble isolé et du câble mis à la terre,

$$r_1 = x + y,$$
$$r_2 = x + z$$

et

$$r_3 = x + \frac{yz}{y + z}.$$

On déduit de là

$$x = r_3 - \sqrt{(r_2 - r_3)(r_1 - r_3)},$$
$$y = r_1 - r_3 + \sqrt{(r_2 - r_3)(r_1 - r_3)}.$$

On peut répéter les essais à l'autre bout de la ligne et prendre des moyennes.

Méthode de M. Kennely. — En admettant la formule empirique de M. Kennely, d'après laquelle la résistance apparente de la faute est

$$z = \frac{K}{\sqrt{i}},$$

lorsque i est inférieur à 25 milli-ampères, on peut procéder comme suit.

On mesure $x + z$ au pont de Wheatstone avec différentes intensités de courant ; soient r_1 la résistance $x + z_1$ lorsque le courant à travers le défaut est i_1 et r_2 la résistance avec un courant quadruple. On a

$$r_1 = x + z_1,$$

$$r_2 = x + \frac{z_1}{2},$$

d'où

$$x = 2r_2 - r_1.$$

On emploiera, par exemple, des courants de 2, 3, 4 milli-ampères, puis des courants de 8, 12, 16 milli-ampères et l'on prendra la moyenne des résultats obtenus.

Méthode de la boucle. — Lorsqu'on dispose de plusieurs conducteurs entre les postes extrêmes, on peut localiser le défaut avec beaucoup plus de sûreté que par les méthodes précédentes, en faisant usage du procédé suivant, qui permet d'éliminer l'influence de la résistance du défaut. On boucle le conducteur défec-

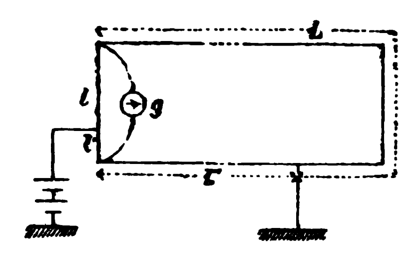


Fig. 193.

tueux avec un conducteur intact à l'un des postes et l'on constitue, à l'autre poste, un pont de Wheatstone à l'aide d'un galvanomètre, de deux boîtes de résistance l et l' et d'une pile. Celle-ci est

pourvue d'une clef d'inversion et une clef de court-circuit empêche le courant de charge de détériorer le galvanomètre. On règle la résistance des boîtes jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. La résistance du défaut étant intercalée dans la diagonale de la pile n'influence pas la mesure par ses variations.

Lorsque l'équilibre est atteint, on peut poser

$$\frac{L}{L'} = \frac{l}{l'}.$$

On détermine, d'autre part, $L + L' = r$ par la méthode ordinaire du pont. Ces deux relations font connaître L et L'. Si le tronçon L' est très court, on ajoute une résistance connue à sa suite, afin de permettre une exactitude plus grande dans la mesure. Lorsqu'on dispose de plus d'un conducteur sain entre les mêmes postes, on répète la mesure avec chacun d'eux et l'on prend des moyennes.

Communication entre deux lignes voisines. — Dans le cas d'un contact entre deux lignes, on isole à l'un des postes l'extrémité de l'une d'entre elles et l'on met l'extrémité de la seconde à la

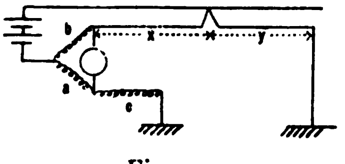


Fig. 194.

terre ; à l'autre poste, on complète un pont de Wheatstone par les connexions indiquées sur la fig. 194. L'essai par le pont permet de déterminer le rapport $\frac{x}{y+c}$, tandis que les mesures périodiques font connaître $x + y$.

Cette méthode élimine complètement l'influence de la résistance du contact. Cette résistance variable est reportée sur une diagonale du pont et sa valeur n'affecte en rien l'équilibre.

Si l'on dispose d'un troisième fil en bon état entre les mêmes postes, on peut adopter la méthode de la boucle en utilisant l'un des fils défectueux à la place du retour par la terre.

Interruption d'une ligne. — Lorsque le conducteur d'un câble est rompu et que les deux tronçons restent isolés dans la gaîne de gutta-percha, on détermine successivement la capacité de ceux-ci par l'une des méthodes de zéro recommandées pour les câbles. Les mesures périodiques faisant connaître la capacité kilométrique, on arrive ainsi à établir l'endroit de la rupture.

Souvent, dans le cas d'interruption d'une ligne sous-marine, la gaîne isolante est également rompue et le conducteur est en contact avec l'eau de mer, au moins par un bout. On utilise alors avec avantage la méthode de Kennely, décrite ci-dessus, pour déterminer la résistance du conducteur jusqu'à l'endroit défectueux.

Chapitre XXVII.

ESSAIS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

Isolement des réseaux. Méthode du voltmètre. — Les canalisations électriques urbaines transportant des courants de basse tension possèdent une résistance d'isolement assez faible. Le réseau à 3 conducteurs de Berlin, qui est constitué par des câbles armés du système Siemens et Halske, comportait, en 1894, 700 kilomètres de câbles souterrains, débitant un courant total de 80 000 ampères sous la tension de 220 volts entre les conducteurs extrêmes. L'isolement total n'était que de 14 ohms environ. Les installations d'abonnés raccordées à un tel réseau présentent un développement dont il est impossible de déterminer exactement la longueur et sont médiocrement isolées. On ne peut donc, dans ce cas, baser le calcul de la résistance d'isolement sur la longueur réelle des conducteurs.

Afin de tourner la difficulté, M. Picou a proposé de considérer l'étendue de la canalisation comme proportionnelle à l'intensité du courant total circulant dans le réseau. Si l'on admet, en outre, que l'isolement doit croître comme la tension, la résistance d'isolement totale d'un réseau peut être exprimée par la formule

$$r = k\frac{e}{i},$$

e étant la différence de potentiel desservant le réseau et i le courant total débité par celui-ci. Le coefficient de proportionnalité reste à déterminer. Dans l'exemple de Berlin, il a pour valeur

$$k = \frac{ir}{e} = \frac{80\,000 \times 14}{220} = 5091.$$

On peut déterminer ainsi l'isolement que doit présenter une portion quelconque d'un réseau, pourvu qu'on connaisse la tension et le courant correspondants.

Dans le cas idéal d'une machine alimentant un réseau parfaitement isolé, la distribution des potentiels absolus dans le réseau est indéterminée, attendu que les lois du courant ne s'occupent que des potentiels relatifs. Mais si un point de la canalisation est mis à la terre, ce point doit prendre immédiatement le potentiel du sol; sinon un courant permanent s'écoulerait du point considéré vers le sol, ce qui est impossible puisque dans ces conditions le circuit de la terre n'est pas fermé. Il en résulte que le potentiel en tous les points du réseau est alors déterminé. S'il existe deux fautes, un courant permanent circule de l'une à l'autre par le sol; l'un des points défectueux prend donc un potentiel positif et l'autre un potentiel négatif; ces potentiels sont en raison des résistances des fautes, ce qui permet de trouver les points du réseau au potentiel nul, qui se trouvent nécessairement entre les fautes considérées.

La résistance à l'isolement d'un réseau à 2 conducteurs est celle qu'on mesurerait entre ceux-ci et la terre. Si les 2 conducteurs ont séparément des résistances à l'isolement r et r', le réseau présente la résistance combinée

$$\frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}}.$$

Lorsque le réseau n'est pas en service, la mesure de l'isolement peut se faire par une des méthodes étudiées précédemment, par celle de l'ohmmètre par exemple. La résistance ainsi trouvée comporte non seulement la valeur de l'isolement des câbles, mais aussi celle de tous les appareils intercalés dans les circuits. Par suite de la complexité de ces appareils, il n'est pas intéressant, en général, de déterminer séparément l'isolement de chacun des conducteurs du réseau; il suffit de déterminer périodiquement la valeur globale

de l'isolement, afin de juger du moment où une chute sérieuse en dessous de la valeur normale exigera une réparation.

Dans les réseaux à courant continu, la détermination de la résistance d'isolement se fait aisément pendant le service par la méthode du voltmètre.

La somme des dérivations vers la terre peut être considérée comme due à une faute unique d'une résistance R qu'il convient de déterminer journellement.

Soient V et V′ les potentiels des points de raccordement de la canalisation avec les dynamos. En reliant le voltmètre de résistance r d'une part à la terre, d'autre part au pôle de potentiel V, l'appareil est traversé par un courant qui, si l'on désigne par v le potentiel du câble à l'endroit du défaut, a pour expression

$$i = \frac{V - v}{r + R}.$$

Le nombre de volts marqué par l'instrument est

$$n = ir = \frac{V - v}{r + R}\, r.$$

En raccordant ensuite le voltmètre au pôle de potentiel V′, on obtient de même

$$n' = i'r = \frac{v - V'}{r + R}\, r.$$

Enfin, les bornes de l'appareil étant reliées aux deux pôles, le voltmètre accuse une tension

$$n'' = V - V'.$$

De là on tire

$$R = \frac{n'' r}{n + n'} - r.$$

La détermination de l'isolement par le voltmètre est applicable à un réseau de conducteurs multiples, attendu que la démonstration ne comporte aucune hypothèse quant à la disposition des récepteurs, qui peuvent être groupés en série, en dérivation ou suivant des combinaisons mixtes.

La méthode ne convient pas si les circuits sont alimentés par des courants alternatifs, à cause du courant de capacité des câbles.

Localisation des défauts d'isolement. Méthodes applicables lors d'un arrêt du service. Méthode de sectionnement. Méthode de la boucle. Méthode de l'auteur. — Lorsqu'un arrêt du service de distribution de l'énergie électrique est possible, on peut appliquer à la recherche des défauts quelques unes des méthodes générales utilisées dans le cas des câbles télégraphiques. Le dérangement qui se produit le plus souvent est une dérivation à la terre.

Nous supposerons qu'aucune partie du réseau n'est raccordée intentionnellement à la terre, ce qui est souvent le cas du conducteur neutre des distributions à fils multiples. Si une liaison de ce genre existe, une faute importante sur l'un des autres câbles occasionne immédiatement la production d'un courant excessif qui fait fondre les sûretés protégeant la partie défectueuse. Dans le cas où une connexion du fil neutre avec le sol a été faite à l'usine, on la rompt au moment de l'essai.

Dans la méthode de sectionnement, on localise la position de la perte à la terre en détachant successivement les divers tronçons et en vérifiant chaque fois l'isolement avec un instrument tel qu'un ohmmètre. Lorsque la section défectueuse est séparée, l'isolement redevient satisfaisant.

Il arrive parfois qu'on ait à localiser une perte à la terre dans une canalisation formée de deux conducteurs bien définis, tels que deux feeders ou deux fils rattachant directement une station génératrice à une station réceptrice. Si l'on peut interrompre le service de ces conducteurs, la méthode de la boucle (chap. XXVI) est applicable.

L'auteur s'est bien trouvé (¹) du procédé suivant, qui permet de localiser aisément un défaut dans une canalisation intérieure (fig. 195).

Supposons, pour plus de simplicité, qu'il s'agisse de rechercher l'emplacement de la perte sur un conducteur *a b* présentant une terre. On isole une des extrémités du fil et l'on relie l'autre extré-

(¹) *Bull. de l'Académie de Belgique*, 1885.

mité à un interrupteur propre à envoyer sur la section défectueuse des courants intermittents. On suit cette section, à partir de la

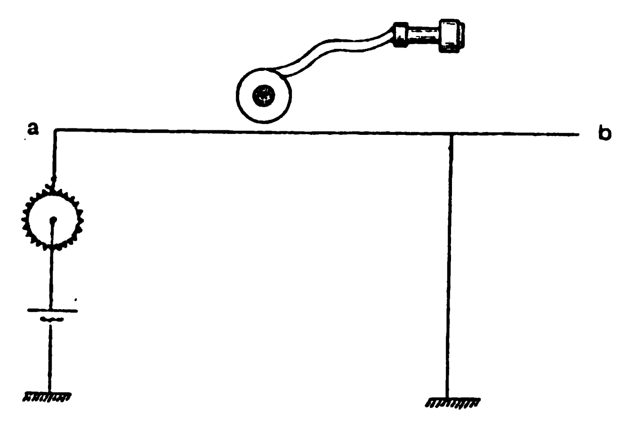


Fig. 195.

pile, en présentant transversalement au conducteur et le plus près possible de ce dernier une bobine droite à noyau divisé comme celui des petites bobines d'induction. L'enroulement de cette bobine est relié à un téléphone que l'opérateur tient à l'oreille. Les courants intermittents provoquent dans la bobine des courants induits accusés par le téléphone. Au moment où l'on dépasse la section défectueuse, le bruit cesse brusquement. On peut ainsi transporter la bobine parallèlement à la direction de fils placés sous des moulures ou dissimulés dans des cloisons.

Localisation des fautes d'un réseau pendant le service. Méthodes de M. Frölich et de M. Hering. — Dans les distributions, on est le plus souvent obligé de déterminer les dérivations à la terre pendant le service.

La méthode du voltmètre, décrite précédemment, permet de localiser l'endroit du défaut dans le cas d'un circuit simple, comme celui de la fig. 196. Désignons par x et y les résistances des deux tronçons de conducteur séparés par la faute. L'un de ceux-ci peut comprendre un groupe de lampes en série ou en dérivation. Soit I le courant total circulant dans la canalisation. On

a, d'après la seconde loi de Kirchhoff, en supposant les courants i et i' qui traversent le voltmètre négligeables devant I,

$$\mathrm{I}\,x - i\,(r + \mathrm{R}) = o,$$
$$\mathrm{I}\,y - i'\,(r + \mathrm{R}) = o,$$
$$\frac{y}{x+y} = \frac{i'}{i+i'}.$$

La méthode suivante, proposée par M. Frôlich pour localiser le défaut, est analogue à celle de la boucle, à cette différence près qu'elle utilise le générateur en service au lieu d'une pile auxi-

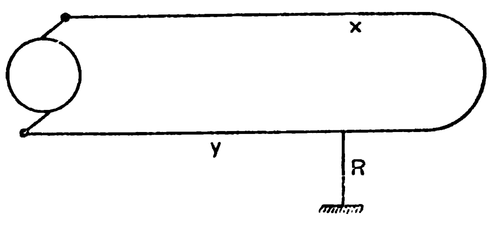


Fig. 196.

liaire. Des résistances réglables a, b et un galvanomètre sont dérivés aux bornes du générateur (fig. 197.) Lorsque l'équilibre du galvanomètre est établi, on a

$$\frac{x}{y} = \frac{a}{b}.$$

La résistance x peut comprendre des lampes en dérivation,

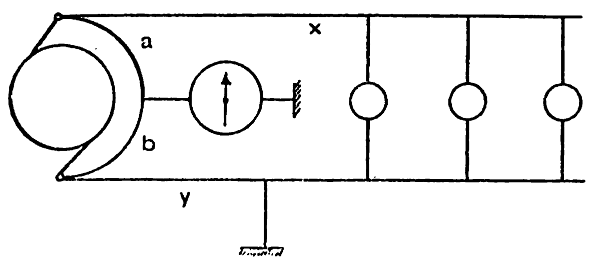


Fig. 197.

comme l'indique le croquis. Ce dispositif est applicable à la recherche d'un défaut sur l'une des branches d'un réseau à 3 ou à

5 conducteurs, pourvu que le conducteur neutre ne soit pas à la terre.

Ces méthodes ne permettent pas de localiser très exactement un dérangement, mais simplement de déceler la région où le défaut existe.

Pour préciser l'endroit défectueux, divers procédés sont employés. Le plus fréquent consiste à constater, à l'aide d'une lampe à incandescence ou mieux d'un voltmètre, les différences de potentiel entre les conducteurs fautifs et la terre, en touchant, dans les boîtes de jonction, d'une part le câble et d'autre part son armature ou le tuyau dans lequel il est posé. A mesure qu'on approche du défaut, la différence de potentiel diminue. On peut ainsi déterminer deux boîtes entre lesquelles le défaut existe. Pour trouver exactement la distance de l'une des boîtes au défaut, la

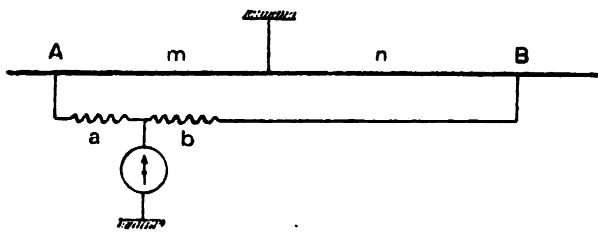


Fig. 198.

méthode suivante, due à M. Hering, est applicable (fig. 198). On emploie une boîte de résistance raccordée à la section défectueuse A B, en se servant, pour la liaison avec l'extrémité B, d'un fil auxiliaire qui peut être un fil pilote, et l'on constitue un pont de Wheatstone avec les deux tronçons de câble m, n, séparés par la faute, le circuit auxiliaire a b et un galvanomètre relié au sol. Lorsque le galvanomètre est en équilibre sous l'action du courant de service, on a

$$\frac{m}{a} = \frac{n}{b}.$$

Si l'on a détaché la section défectueuse du réseau, on peut se servir d'une pile d'essai et de deux circuits auxiliaires : un circuit pour les résistances de proportion et un circuit comprenant le galvanomètre (fig. 199).

Dans ces deux dispositifs, il est possible de substituer un téléphone au galvanomètre, si l'on intercale dans la diagonale correspondante un interrupteur.

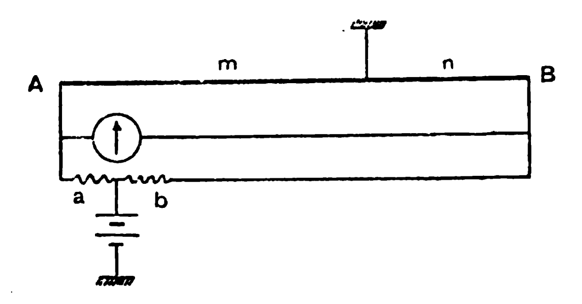


Fig. 199.

Indicateurs de terre et dispositifs automatiques pour la localisation des fautes dans les réseaux en service. — Dans les réseaux électriques peu étendus, on adopte souvent le dispositif suivant, propre à accuser immédiatement un défaut d'isolement. Soient deux conducteurs en relation avec les deux pôles d'un générateur développant une différence de potentiel constante (fig. 200). Deux

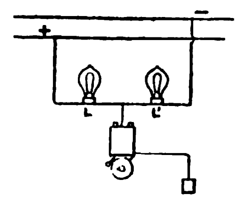


Fig. 200.

lampes à incandescence, L et L', réglées chacune pour cette tension, ne fournissent, quand elles sont disposées en série comme l'indique le croquis, qu'une lumière rougeâtre de faible intensité. Le fil de jonction des lampes est relié à la terre par l'intermédiaire d'une sonnerie trembleuse, mise en dérivation sur une résistance non inductive pour éviter les fortes étincelles d'extra-courant.

Dès qu'un défaut d'isolement sérieux se produit dans la canalisation, la sonnerie entre en activité, grâce au courant de perte ; celui-ci, traversant l'une des lampes, lui donne un éclat supérieur

à celui de la lampe voisine. Dans le cas d'un contact du conducteur supérieur avec la terre, c'est la lampe L dont la lumière devient la plus vive.

Souvent, on se contente d'une seule lampe témoin, dont une des bornes est reliée convenablement à la terre et qu'un commutateur permet de raccorder successivement aux deux pôles des générateurs. L'éclat de la lampe est différent pour les deux positions, si le circuit présente une terre accidentelle.

Lorsque les conducteurs sont alimentés par des courants alternatifs de haute tension, on peut appliquer la méthode précédente en substituant à la lampe la bobine à fil fin d'un transformateur réducteur, dont l'enroulement à gros fil est fermé sur une lampe ou sur un voltmètre.

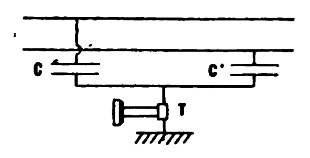


Fig. 201.

M. Picou a imaginé un autre dispositif applicable aux circuits à courants alternatifs. Les deux conducteurs de la distribution sont réunis à des condensateurs formés de deux plaques (fig. 201). Les armatures libres communiquent avec un téléphone relié à la terre. Le fil de jonction est parcouru par des courants alternatifs ; le téléphone l'est également s'il se déclare une terre dans le circuit. L'appareil est à indications continues et le bruit du téléphone peut être rendu assez intense pour être entendu à distance.

Les moyens précédents ne conviennent pas pour les réseaux étendus qui présentent toujours des pertes plus ou moins importantes et qui exigent une localisation rapide des défauts lorsque ceux-ci sont graves.

Dans le réseau urbain de Berlin, on a adopté des dispositions automatiques propres à déceler immédiatement une perte importante à la terre et à localiser cette perte (fig. 202 et 203). Indépendamment du réseau général d'alimentation des récepteurs, on a constitué de petits réseaux partiels, au moyen de fils pilotes enfermés dans les

câbles et séparés de ceux-ci par une légère couche isolante. Le fil pilote d'un câble positif A (fig. 202) est connecté dans la boîte de jonction à la borne négative par l'intermédiaire d'une résistance *r*,

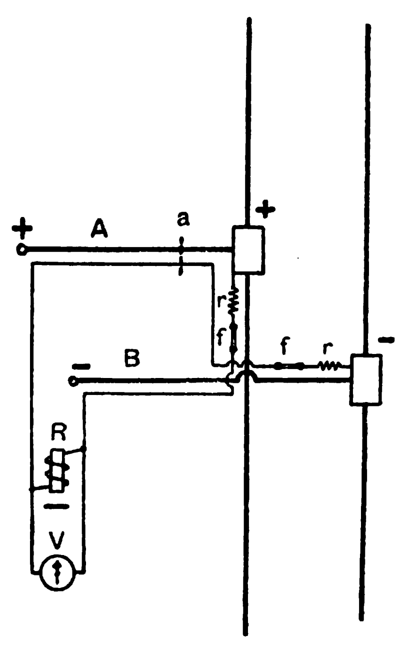


Fig. 202.

destinée à diminuer éventuellement la différence de potentiel entre le câble et un plomb fusible *f*. Inversement, le fil pilote du câble négatif correspondant est relié à la borne positive de la boîte.

A l'usine électrique, ces fils pilotes sont raccordés à un voltmètre V, ainsi qu'à un relais R. Si un défaut d'isolement se produit en *a*, par exemple, un courant intense naît entre le fil pilote négatif et le câble positif, ce qui amène la fusion du plomb qui protège le fil pilote. Les deux bornes du relais sont alors ramenées sensiblement au même potentiel, l'armature rendue libre ferme le circuit d'une sonnerie d'avertissement, faisant ainsi connaître la partie du réseau dans laquelle le défaut s'est produit.

Pour localiser le défaut, le système suivant est adopté dans les réseaux à trois conducteurs (fig. 203). Le conducteur neutre de la

distribution est pourvu d'un fil pilote, relié d'une part à la terre par sa connexion avec l'armature du câble, et d'autre part à un relais dont la seconde borne est aussi à la terre. Si une dérivation au sol se produit en *a*, par exemple, la terre et l'armature du câble prennent, au voisinage du défaut, un potentiel positif suffisant pour provoquer dans le fil pilote un courant capable d'attirer la palette du relais et de mettre ainsi une sonnerie en jeu. A l'aide

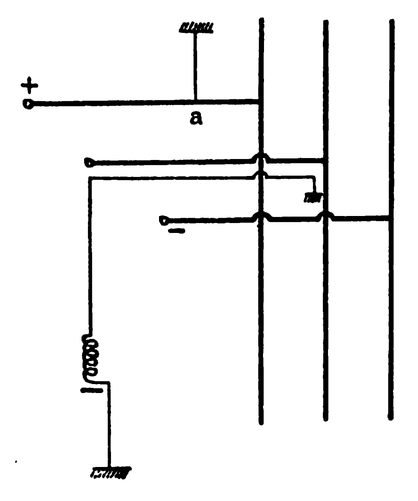


Fig. 203.

d'un galvanomètre substitué au relais, on détermine alors la différence de potentiel et partant l'importance du défaut. En multipliant suffisamment les fils d'épreuve, on peut déterminer sur quelle section d'un câble se trouve le défaut. On applique ensuite une méthode semblable à celle de M. Hering pour préciser l'endroit du dérangement.

Chapitre XXVIII.

ESSAIS SPÉCIAUX AUX RÉSEAUX DE TRACTION ÉLECTRIQUE.

Nous supposerons le cas d'un tramway à fil de trolley, qui est le plus fréquent. Les indications données à ce sujet seront aisément étendues aux autres systèmes. Outre les essais de résistance, d'isolement et la recherche des défauts, qu'on doit effectuer dans les réseaux de conducteurs de traction aussi bien que dans les réseaux d'éclairage, il se présente dans les premiers des mesures spéciales. Sans parler des essais de génératrices et de moteurs, qui seront visés dans des chapitres suivants, on rencontre des déterminations de la résistance du retour par la terre, de la conductance des joints de rails et de la différence de potentiel entre les rails et la terre.

Résistance des lignes. — Pour apprécier la résistance électrique d'une ligne de trolley, le moyen le plus simple est de se servir de la méthode de l'ampèremètre et du voltmètre. Pendant que le service est interrompu, on envoie sur le tronçon de ligne dont on cherche la résistance une voiture qui est arrêtée à l'endroit

du raccord d'un feeder avec le fil de trolley. De l'usine on envoie dans ce dernier un courant dont l'intensité, mesurée par un ampèremètre, est réglée par le rhéostat de la voiture. A l'aide d'un voltmètre, on mesure la différence de potentiel successivement entre l'origine du fil de trolley et les rails, puis entre ceux-ci et le point du fil de trolley où aboutit le feeder, point que l'on raccorde au voltmètre par l'intermédiaire de ce feeder employé en guise de fil de connexion. La chute de potentiel sur le fil de trolley déterminée par ces mesures, divisée par le courant, donne la résistance du fil.

Dans les lignes qui possèdent des fils pilotes spéciaux, on peut se servir de ces derniers pour effectuer les connexions. A défaut d'autre intermédiaire, on utilisera des fils téléphoniques de service pour le raccordement du bout de la ligne au voltmètre.

Résistance du retour. — La résistance du retour par les rails se détermine d'une manière analogue : en même temps que l'intensité du courant, on note la différence de potentiel entre les rails au voisinage de l'usine et les rails à l'extrémité de ligne, auxquels on relie le fil pilote ou le conducteur qui en tient lieu.

Il va sans dire que les mesures peuvent être répétées aux différents points des lignes où aboutissent des fils pilotes ou des feeders, ce qui permet de préciser les sections défectueuses.

La résistance d'un feeder de retour s'apprécie par le même procédé.

Résistance des joints de rails. — Lorsqu'on veut estimer la résistance des joints des rails, on compare ordinairement celle-ci à celle d'un bout de rail de même longueur sans joint. Dans ce but, on fait arriver, par l'intermédiaire du fil de trolley et d'une voiture, un courant qui retourne par les rails, et l'on compare, à l'aide d'un voltmètre, la chute de potentiel entre deux frotteurs à écartement constant placés successivement sur le bout de rail plein et sur le tronçon jointé. Le voltmètre employé doit être suffisamment sensible pour permettre d'estimer la différence de potentiel occasionnée par un courant d'une cinquantaine d'ampères dans un bout de rail de 1 m, dont la résistance n'est que de 0,000014 ohm, pour une voie de 40 kg au mètre.

Le courant servant à la mesure peut être fourni par l'usine ou par des couples secondaires portés par une voiture.

Lorsque les joints des rails ne sont pas alternés, il est possible de vérifier rapidement leur conductance en faisant circuler sur la voie une voiture automobile et une voiture remorquée dont les trucs communiquent par un voltmètre à bas voltage. Chaque passage de joints de rails est accusé par une variation de la tension indiquée par l'instrument. Une variation anormale accuse un joint défectueux.

Isolement. — La résistance d'isolement des fils de trolley et des feeders s'estime par la méthode de déviation (chap. XIII).

Un moyen simple consiste à faire usage d'un voltmètre de résistance r, à l'aide duquel on mesure d'abord la tension de service V entre les rails et le pôle des génératrices raccordé à la ligne isolée.

On met ensuite le voltmètre en série avec la ligne susdite. On observe dans l'appareil une chute de potentiel ν ; on en déduit l'intensité du courant de perte

$$i = \frac{\nu}{r}.$$

La résistance d'isolement de la ligne est donc

$$R = \frac{V - \nu}{i} = r\left(\frac{V - \nu}{\nu}\right).$$

Des moyens analogues servent à déterminer l'isolement des rails par rapport aux conduites voisines, en ayant égard toutefois à la différence de grandeur de ces résistances, les dernières étant de l'ordre des ohms, et en prenant des précautions pour éviter les perturbations dues aux courants telluriques et aux courants de polarisation.

Recherche des dérangements. — Les défauts les plus fréquents sont les contacts entre les lignes et la terre et les interruptions de ligne.

On trouvera ici l'application des méthodes décrites à propos des réseaux électriques en général.

Parmi ces méthodes, la méthode de sectionnement est d'un emploi fréquent. On détache successivement les divers tronçons

jusqu'à ce que les appareils de mesure n'accusent plus de défaut. Le dernier tronçon enlevé est celui qui présente le dérangement.

La méthode du téléphone indiquée par l'auteur (chap. XXVII) peut rendre des services. Elle est utilisée couramment par la Société des Tramways Bruxellois, qui a installé à demeure à l'usine centrale un mécanisme susceptible d'envoyer des courants interrompus sur les lignes.

Différences de potentiel entre les rails et les conduites ou entre les diverses sections de rails. — En vue d'éviter les dangers d'électrolyse des tuyaux voisins des voies, les règlements prescrivent une limite de différence de potentiel, soit entre les diverses sections des rails d'une ligne, soit entre les rails et les conduites.

Pour relever la première tension, on utilise des fils pilotes. Un voltmètre à bas voltage est raccordé d'une part aux rails voisins de l'usine et d'autre part aux divers points de la voie ferrée. Les différences de potentiel ainsi accusées ne doivent pas dépasser une limite qui est ordinairement fixée à 5 volts.

Pour mesurer la chute de potentiel entre les rails et les conduites voisines, on doit avoir soin de recourir à des voltmètres de très grande résistance, car, sinon, le courant dans le voltmètre peut changer complètement la tension cherchée, eu égard à la grande résistance de la terre traversée par le courant. La méthode d'opposition (chap. XII) permet d'éliminer cette cause d'erreur.

Chapitre XXIX.

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

Mesure de la force électromotrice. — Une pile est définie, au point de vue électrique, par sa force électromotrice et sa résistance intérieure. C'est abusivement qu'on appelle ces quantités *constantes* de la pile, attendu qu'elles ne peuvent avoir de signification précise que pour un régime déterminé de courant et une durée donnée de passage de celui-ci. Les phénomènes qu'on désigne sous le nom de polarisation ont pour effet de modifier la force électromotrice et la résistance intérieure des couples voltaïques dans des rapports encore mal définis. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant de voir que si, à circuit ouvert, les essais de force électromotrice donnent des résultats concordants, qui ont permis d'adopter certaines piles comme étalons de force électromotrice, les mesures de la force électromotrice à circuit fermé et de la résistance intérieure conduisent à des valeurs qui diffèrent suivant les régimes de courant auxquels les couples sont soumis pendant les essais. Alors qu'on est en droit d'exiger une grande approximation pour la mesure de la force électromotrice des piles à circuit ouvert, le 0,001 pour l'élément Clark par exemple, on ne

peut atteindre qu'une concordance beaucoup moins satisfaisante dans l'essai des piles à circuit fermé.

Nous avons étudié, à l'occasion de la mesure des potentiels, un certain nombre de méthodes applicables à la détermination de la force électromotrice des piles, entre autres la méthode de l'électromètre, celle du galvanomètre balistique, celle du voltmètre, celles de Poggendorff, de Clark, de Lacoine. Dans la plupart de ces méthodes, il est possible de ne faire débiter à la pile étudiée qu'un courant extrêmement faible ou nul, de sorte que, dans ces conditions, le résultat peut être considéré comme la valeur de la force électromotrice de la pile à circuit ouvert.

Mesure de la résistance intérieure d'une pile. Méthode des déviations réduites. — La quantité à mesurer dépend de l'intensité du courant fourni par la pile. Il faut donc chercher à donner au courant des valeurs qui ne s'écartent pas trop de celles que la pile est appelée à produire dans les applications auxquelles on la destine.

La méthode des déviations réduites a la plus grande analogie avec la méthode de ce nom appliquée à la mesure de la résistance d'un galvanomètre. On constitue un circuit à l'aide de la pile essayée, d'un galvanomètre shunté, d'une boîte de résistance et d'une clef. ρ étant la résistance de la pile, g la résistance combinée du galvanomètre et du shunt de pouvoir multiplicateur m et r la résistance débouchée dans la boîte, on obtient une déviation α telle que

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{(\rho + g + r)m}.$$

Une résistance r' prise dans la boîte donne un courant

$$i' = \frac{\alpha'}{k} = \frac{e}{(\rho + g + r')m},$$

si l'on suppose que la force électromotrice de la pile est restée la même dans les deux cas. On ne peut admettre cette hypothèse que si les courants i et i' sont très peu différents et si la clef de circuit n'est abaissée que pendant le temps strictement nécessaire pour les lectures.

Des deux équations précédentes, on tire

$$\rho = \frac{\alpha'(g+r') - \alpha(g+r)}{\alpha - \alpha'}.$$

Si l'on conduit la discussion comme dans la méthode appliquée au galvanomètre, on trouve que la plus grande exactitude est atteinte en réduisant autant que possible la résistance r de manière à accroître α, et en choisissant r' de façon à obtenir, dans la seconde expérience, une déviation moitié moindre que α. Toutefois, les considérations exposées plus haut ne permettent pas de faire descendre la résistance des parties métalliques du circuit en dessous d'une certaine limite, égale au moins à la résistance de la pile avec les couples du genre Daniell et très supérieure à cette valeur avec les piles très polarisables, comme l'élément Leclanché.

Lorsqu'on effectue la mesure avec un galvanomètre sensible, on applique aux bornes de ce dernier un shunt qui rend g négligeable devant r et r'.

Méthode des déviations égales. — La méthode est analogue à celle exposée au sujet des galvanomètres.

On met en circuit un galvanomètre shunté, de résistance combinée g, une boîte de résistance r et une pile e, ρ, shuntée par une résistance s.

On a

$$i = \frac{\alpha}{k} = \frac{e}{\rho + \frac{s(g+r)}{s+g+r}} \times \frac{s}{g+s+r} \times \frac{1}{m}.$$

On supprime le shunt s et l'on débouche dans la boîte une résistance r' reproduisant la déviation α ; il vient

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{e}{\rho + g + r} \times \frac{1}{m};$$

d'où

$$\rho = \frac{s(r'-r)}{r+g}.$$

Il est commode de commencer par l'expérience dans laquelle la

pile n'est pas shuntée, afin de trouver la valeur r' qui correspond à la plus grande déviation possible du galvanomètre.

Les réserves faites à propos de la méthode précédente doivent être prises en considération lorsqu'on discute la méthode des déviations égales. Cette discussion se conduit d'ailleurs de la même manière que lorsqu'il s'agit de la résistance des galvanomètres.

Méthode de Mance. — La méthode de Mance présente une grande analogie avec celle de Lord Kelvin. La pile est insérée dans

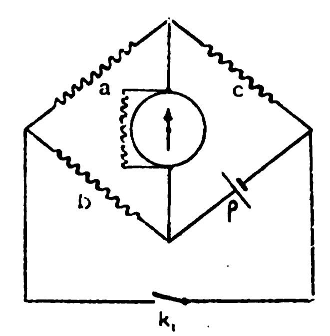


Fig. 204.

la branche inconnue d'un pont de Wheatstone et les résistances a, b, c sont réglées jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre reste constante dans les deux positions de la clef k_1.

On a alors

$$\rho = \frac{b\,c}{a}.$$

Les conditions du maximum de sensibilité sont analogues à celles de la méthode de Lord Kelvin. Pour obtenir la plus grande déviation possible, le zéro de la graduation peut être pris à l'une des extrémités de l'échelle.

On remarquera que, dans cette méthode, les deux positions de la clef k_1 correspondent à des courants très différents débités par la pile ; aussi ne doit-on pas s'attendre à des résultats très précis avec les piles polarisables.

On peut augmenter la résistance à mesurer sans faire croître la force électromotrice en employant $2n + 1$ éléments dont n sont en opposition par rapport à $n + 1$.

Méthode de M. Kohlrausch. — La méthode proposée par ce physicien pour la mesure de la résistance des électrolytes s'applique à la détermination de la résistance des piles. Le dispositif à téléphone permet une mesure rapide. Si l'on craint que le courant de la pile ne soit trop fort pour un couple polarisable ou encore lorsqu'on mesure la résistance intérieure d'accumulateurs dont le courant pourrait détériorer les appareils, on met deux éléments en opposition, de manière à supprimer le courant continu et à ne laisser passer que les courants alternatifs servant à l'essai. On sait quelles difficultés la self-induction des branches du pont et la capacité de polarisation des électrodes apportent dans l'exécution de la mesure, mais ces objections n'ont pas ici la même valeur que dans le cas des électrolytes, attendu qu'on ne cherche pas à atteindre une grande précision.

La méthode de M. Kohlrausch offre cette particularité de donner pour la résistance intérieure de la pile des valeurs indépendantes de la force électromotrice des couples et qui ne sont pas, par suite, entachées des erreurs qu'amènent, dans les autres méthodes, les variations de celle-ci.

Méthode de M. Uppenborn. — M. Uppenborn a modifié la méthode de M. Kohlrausch, de manière à permettre la mesure de

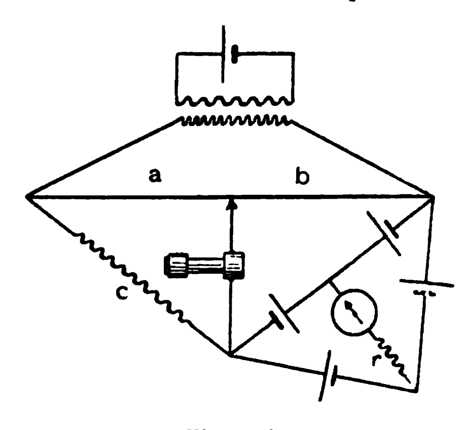


Fig. 205.

la résistance intérieure des piles ou des accumulateurs sous divers régimes de courant.

On remplace le couple unique par quatre éléments, disposés en opposition par rapport au pont et groupés par deux en série et deux en dérivation sur une résistance variable *r*, mise à la suite d'un ampèremètre (fig. 205).

En modifiant *r*, on fait produire aux éléments des courants différents. On mesure en même temps, par le dispositif de M. Kohlrausch, la résistance combinée des quatre couples, qui est égale à celle d'un seul élément. Ni l'ampèremètre, ni *r* ne sont traversés par les courants alternatifs.

Méthode de M. Boccali. — M. Boccali a aussi modifié la méthode de M. Kohlrausch, en vue de mesurer la résistance intérieure d'un accumulateur pendant la charge et pendant la décharge.

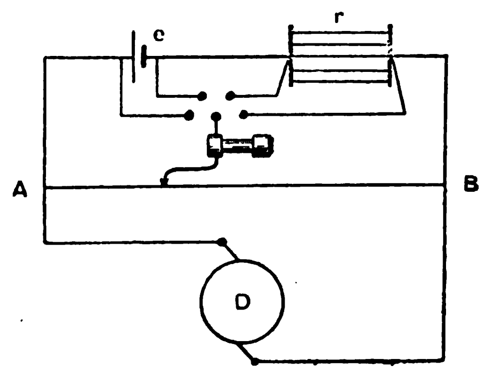


Fig. 206.

L'accumulateur *e* et la dynamo de charge D sont mis en série avec une résistance *r* formée de barres groupées en parallèle. Un fil calibré AB est placé en dérivation. Les variations du courant dues au passage des balais de la dynamo sur les lames du collecteur suffisent pour faire vibrer le diaphragme téléphonique, tant que l'équilibre n'est pas réglé. Pour éliminer les résistances des fils de connexion, qui ne sont pas négligeables devant celle de l'élément secondaire, on fait quatre mesures en raccordant le téléphone aux quatre contacts indiqués.

Pour déterminer la résistance de l'élément secondaire pendant la

décharge, on remplace la dynamo par un interrupteur à manivelle produisant, dans le courant de décharge, des variations suffisantes pour agir sur le téléphone.

La méthode précédente peut aussi être employée pour mesurer la résistance d'une lampe à arc pendant son fonctionnement. Comme la tension en A B est alors élevée, on substitue au fil divisé une résistance liquide.

Méthode par le voltmètre. — On adopte souvent la méthode suivante, qui a l'avantage de la rapidité.

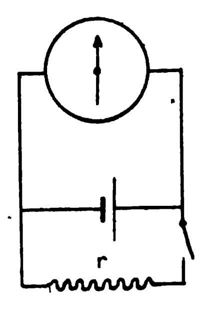


Fig. 207.

On mesure la force électromotrice e à circuit ouvert à l'aide d'un galvanomètre employé comme voltmètre ; puis on met la pile en circuit sur une résistance connue r. La différence de potentiel aux bornes e', accusée alors par le voltmètre, est, dans l'hypothèse où la force électromotrice de la pile n'a pas changé,

$$e' = e \frac{r}{r + \rho}.$$

On tire de là

$$\rho = r \frac{(e - e')}{e'} = \frac{r(\alpha - \alpha')}{\alpha'}.$$

Pour que la force électromotrice ne soit pas altérée, il faut que le galvanomètre soit à indications rapides et que la résistance extérieure ne soit pas trop faible. Si l'on discute la méthode sans se soucier de la polarisation, on trouve que l'erreur de lecture a la moindre influence lorsque r est voisin de ρ ; mais, avec les piles très polarisables, on obtient dans ces conditions des valeurs beaucoup trop fortes pour la résistance intérieure.

Lorsqu'on ne connaît pas la résistance r, on peut mesurer le courant i qui la traverse à l'aide d'un ampèremètre.

La relation est alors

$$i = \frac{e}{r+\rho} = \frac{e'}{r} = \frac{e-e'}{\rho},$$

d'où

$$\rho = \frac{e-e'}{i}.$$

Méthode de Munro. — La méthode de Munro, susceptible de beaucoup de variantes, s'applique surtout aux piles polarisables.

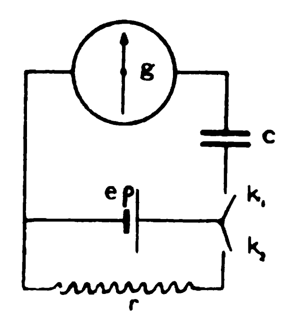


Fig. 208.

Un condensateur c est disposé à la suite d'un galvanomètre balistique g. Par l'abaissement de la clef k_1, on charge le condensateur d'une quantité d'électricité

$$q = \frac{\alpha}{K} = ce,$$

c étant la capacité du condensateur, e la force électromotrice de la pile et K la constante balistique du galvanomètre. En abaissant la clef k_2, on décharge partiellement le condensateur, dont la charge est alors réduite à

$$q' = ce' = ce\,\frac{r}{r+\rho}.$$

Le galvanomètre est traversé par la quantité d'électricité déchargée

$$q - q' = \frac{\alpha'}{K} = \frac{\alpha}{K}\left(1 - \frac{r}{r+\rho}\right);$$

on tire de cette équation

$$\rho = \frac{r\,\alpha'}{\alpha - \alpha'}.$$

Dans cette méthode, on suppose que la force électromotrice de la pile n'a pas changé au moment de la fermeture de la clef k_2.

Chapitre XXX.

ACCUMULATEURS.

Objet des essais. — Outre la détermination de la force électromotrice et de la résistance intérieure qui s'effectue par les méthodes signalées dans les chapitres précédents, en ayant égard aux courants élevés que peuvent produire les piles secondaires, celles-ci comportent des mesures de capacité voltaïque, d'énergie emmagasinée, de rendement en quantité et de rendement en énergie, sous divers régimes de courant. En vue de rendre les résultats comparables, on rapporte ordinairement la capacité, l'énergie et la puissance d'un élément secondaire au kilogramme de plaques contenues dans celui-ci.

Pour estimer ces quantités, on relève pendant la charge comme pendant la décharge, et à des intervalles de temps suffisamment rapprochés pour observer leurs variations, la différence de potentiel et l'intensité du courant.

On dresse des courbes dont les abscisses représentent les temps et les ordonnées les valeurs de la différence de potentiel, du courant et de la puissance correspondant aux diverses observations. Ces courbes permettent de déterminer, à l'aide du planimètre par exemple, les

quantités d'électricité absorbée et rendue par la pile, ainsi que l'énergie dépensée et l'énergie recueillie. On déduit de là le rendement en quantité et le rendement en énergie.

Il faut se garder de considérer comme puissance moyenne le produit de la différence de potentiel moyenne par l'intensité moyenne du courant : on doit prendre la moyenne des produits des tensions par les courants correspondants.

Pour faciliter les observations, on peut se servir utilement d'appareils enregistreurs. Un ampèremètre enregistreur fait connaître la capacité utile et le rendement en quantité. Il est à remarquer qu'un compteur Aron peut également fournir ces éléments : la quantité d'électricité emmagasinée et la quantité rendue se traduisent par des indications inverses au totalisateur, lequel, à la fin de la décharge, renseigne la différence entre les coulombs absorbés et les coulombs restitués. En utilisant un ampèremètre et un voltmètre enregistreurs, on peut relever les éléments nécessaires pour déterminer l'énergie emmagasinée et le rendement en énergie. Un wattmètre enregistreur fournit plus directement encore ces dernières quantités.

Si l'on doit effectuer un grand nombre d'essais, on utilise avec avantage la disposition suivante. Lors de la charge, l'accumulateur est mis en circuit avec un rhéostat sur une distribution à tension constante. Un ampèremètre sert à régler le régime du courant ; un coulombmètre ou un ampèremètre enregistreur indique la quantité d'électricité emmagasinée ; un wattmètre enregistreur ou un joulemètre renseigne l'énergie absorbée ; enfin, un voltmètre sert à fixer la tension limite de charge.

Les mêmes instruments sont employés à la décharge, le rhéostat servant à absorber l'énergie débitée.

On se rappellera que le rendement d'un accumulateur dépend en grande partie des états de service antérieurs de l'élément. Ainsi, lorsqu'après avoir surchargé un couple secondaire, on le décharge jusqu'à ce que la différence de potentiel tombe à la limite inférieure normale, on peut trouver qu'une charge et une décharge normales, faites ensuite, donnent un rendement en quantité supérieur à 100 pour 100, la seconde décharge restituant une partie de l'énergie dépensée dans la première charge.

Pour obtenir des résultats comparables, il est indispensable de commencer par faire subir au couple une série ininterrompue de charges et de décharges poussées jusqu'aux mêmes limites de différence de potentiel. Si l'accumulateur a été antérieurement trop chargé, on constate que les rendements vont en décroissant jusqu'à une valeur constante. Lorsqu'il a été trop déchargé ou lorsqu'il a été abandonné pendant quelque temps à lui-même, on reconnaît, au contraire, que les essais successifs donnent des rendements croissant jusqu'à cette même valeur constante, qui constitue le rendement vrai. Les essais électriques des accumulateurs sont toujours complétés par des essais densimétriques destinés à montrer les variations de poids spécifique du liquide des éléments pendant la charge et la décharge.

Souvent on exige que les expériences effectuées sur les accumulateurs se rapprochent des conditions d'emploi de ces appareils. C'est ainsi que les piles secondaires utilisées à la traction peuvent être soumises pendant les essais à des courants de décharge variables et à des trépidations, afin de voir l'influence de ces circonstances sur le rendement et la durée des éléments.

Comme l'extrapolation est toujours dangereuse dans les phénomènes physiques, il est inutile de dire que l'on ne peut être fixé sur la durée d'un accumulateur que par une expérience de durée. Un certificat d'essai qui ne porte que sur quelques charges et décharges n'a aucune valeur à cet égard.

On peut se rendre compte du rôle de chacune des électrodes pendant la décharge d'un couple secondaire. Dans ce but, on fait usage d'une électrode auxiliaire en cadmium ou en peroxyde de plomb, que l'on immerge dans le liquide et qui est reliée à l'une des bornes d'un voltmètre, l'autre borne étant mise en communication alternativement avec les deux pôles de l'accumulateur.

La différence algébrique des deux voltages ainsi relevés est égale à la force électromotrice du couple. Si l'on trace les diagrammes figurant les variations de ces voltages avec le temps, on voit que la différence de potentiel entre le cadmium et les plaques positives tombe rapidement quand la décharge de celles-ci approche de la fin, tandis que la différence de potentiel se relève entre l'électrode auxiliaire et les plaques négatives quand ces dernières s'épuisent.

Il est souvent utile de donner une idée de l'isolement d'une batterie secondaire. Soit E la force électromotrice de cette dernière. Après avoir isolé les pôles de la batterie, on les relie successivement à un ampèremètre communiquant d'autre part avec la terre. Appelons I et I' les courants observés. On peut définir sous le nom de résistance à l'isolement le rapport $R = \frac{E}{I + I'}$.

Chapitre XXXI.

GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Avant d'aborder l'étude détaillée des méthodes d'essai des générateurs, moteurs et transformateurs électromagnétiques, nous donnerons quelques indications générales sur les définitions et les conventions établies au sujet du rendement, de l'échauffement et de l'isolement de ces appareils [1].

Divers règlements, entre autres celui de l'American Institute of Electrical Engineers, ont cherché à codifier les règles usitées à cet égard. Nous suivrons dans ses lignes générales le règlement américain, en conservant la classification des appareils adoptée dans nos *Leçons sur l'Electricité.*

Rendement. — Le rendement d'un appareil électromagnétique est le rapport de la puissance utilisable à la puissance reçue.

Dans les appareils à courants alternatifs, sauf convention contraire, la puissance électrique est mesurée lorsque le courant

(1) *Éclairage électrique ;* 21 octobre 1899.

est en coïncidence de phase avec la différence de potentiel, à moins qu'il n'existe une différence de phase inhérente, comme c'est le cas pour les moteurs asynchrones et pour les circuits primaires des transformateurs.

Dans l'estimation de la puissance mécanique des machines, on doit exclure les pertes dues aux engrenages, courroies ou autres intermédiaires, pour ne comprendre que les pertes mécaniques dues aux frottements propres de la machine et à la ventilation occasionnée par le déplacement des parties mobiles de celle-ci. Il est cependant des cas, tels que celui des moteurs de tramway, où les frottements des engrenages sont compris dans l'estimation du rendement.

Les pertes par frottement et par ventilation sont habituellement considérées comme indépendantes de la charge, afin de simplifier l'évaluation du rendement. C'est pour une raison semblable que, quand une machine est montée sur l'arbre même du moteur qui l'entraîne, on ne tient pas compte dans l'estimation de son rendement des pertes par frottement et par ventilation.

Lorsqu'une machine comporte un appareil auxiliaire, une excitatrice par exemple, les pertes de puissance dans cette dernière ne sont pas imputées à la machine principale, mais à l'ensemble de celle-ci et de l'excitatrice. Le rendement de l'ensemble sera, dans ce cas, distingué du rendement de la machine proprement dite.

Le rendement peut être déterminé en mesurant toutes les pertes individuellement et en ajoutant ou en soustrayant ensuite leur somme suivant qu'on a affaire à une puissance fournie ou à une puissance reçue. Normalement, les pertes doivent être mesurées à la température correspondant au fonctionnement normal ou ramenées à cette température.

Surélévation de la température. — En service régulier, la température d'un appareil électrique ne doit jamais dépasser une valeur à laquelle les matières isolantes pourraient se détériorer.

La manière la plus exacte de déterminer l'élévation de température des conducteurs en cuivre est de noter l'augmentation de résistance et d'appliquer la formule

$$R_t = R_{t'} [1 + 0,004 (t - t')].$$

Les résultats ainsi obtenus sont ordinairement plus grands que ceux fournis par le thermomètre.

Lorsqu'on utilise ce dernier instrument pour prendre la température des pièces chauffées, on l'applique sur celles-ci en protégeant le réservoir pour prévenir les radiations.

La surélévation de température doit s'exprimer en admettant que la température de la salle des machines est de 25° C, que la pression atmosphérique correspond à 760 mm de mercure et que les conditions de ventilation sont normales, c'est à dire que les appareils essayés ne sont ni placés dans un courant d'air, ni enfermés, sauf stipulations contraires.

Si la température de la salle diffère de 25° C pendant la durée des essais, l'accroissement de température observé sera corrigé à raison de 0,5 pour 100 par degré, pour tenir compte des variations du coefficient de température du cuivre suivant la température initiale. C'est ainsi que, pour une température de 35° C dans la salle des machines, la surélévation de température observée devra être diminuée de 5 pour 100. Elle sera majorée du même tantième si la température ambiante n'est que de 15° C.

Le thermomètre indiquant la température de la salle sera soustrait aux radiations calorifiques émises par les corps chauffés et mis à l'abri des courants d'air.

Les températures doivent être prises après un fonctionnement d'une durée assez longue pour être devenues pratiquement constantes. On admet qu'une durée de six à dix-huit heures est suffisante suivant le volume et la construction de l'appareil. On pourra toutefois diminuer la durée de l'essai en faisant fonctionner la machine pendant un certain temps en surcharge, puis en revenant à la puissance normale jusqu'à ce que la température soit devenue invariable.

Dans les appareils destinés à un fonctionnement intermittent, comme les moteurs de tramway, les rhéostats de démarrage, etc., la surélévation de température sera mesurée après une durée plus courte de fonctionnement, dépendant de la nature du service qui sera bien spécifiée.

Les valeurs maxima que l'on peut admettre pour la surélévation de température sont :

Pour les inducteurs et induits des génératrices et moteurs à courant continu et à courants alternatifs (par résistance) . . . . 50° C
Pour les induits en court-circuit des moteurs asynchrones . . 55° C
Pour les collecteurs et bagues de frottement . . . . 55° C
Pour les paliers et autres parties des machines (par thermomètre) . . . . 40° C
Pour les circuits électriques des transformateurs statiques en service continu (par résistance) . . . . 50° C
Pour les rhéostats et régulateurs (par résistance). . . . . . 55° C

Quand on connaît la loi qui régit l'échauffement d'une machine en fonction du temps, on peut prescrire une surélévation de température moindre, en diminuant la durée de l'essai. Avec les transformateurs pour éclairage, la durée de pleine charge peut être prise égale à trois heures, à moins d'autre spécification.

Isolement. — La résistance d'isolement n'a qu'une importance secondaire lorsqu'on la compare à la valeur diélectrique de la matière employée comme isolant, c'est à dire à la résistance à la rupture sous une haute tension.

La résistance d'isolement peut, en effet, être augmentée par le séchage, tandis que ce dernier peut, au contraire, amoindrir le pouvoir diélectrique.

Résistance d'isolement. La résistance d'isolement doit, autant que possible, être prise avec la tension à laquelle l'appareil doit fonctionner. On fixe habituellement la résistance d'isolement de telle sorte que le courant de perte ne dépasse pas un tantième du courant normal. Parfois, on indique une limite de résistance minima, telle qu'un mégohm.

Valeur diélectrique. La valeur diélectrique ou résistance à la rupture pour haute tension est déterminée par l'application d'une tension alternative pendant une minute. Les essais sont faits quand les isolants sont secs, avant la mise en service industriel des appareils. Le voltage d'essai est appliqué entre les enroulements et la masse et entre les divers enroulements isolés les uns des autres.

On shunte les appareils essayés par des circuits de décharge statique interrompus entre des aiguilles dont les extrémités sont

écartées à des distances telles que l'étincelle disruptive éclate pour un voltage de 10 pour 100 supérieur à celui avec lequel on veut opérer.

Les voltages suivants sont recommandés :

Voltage de service.	*Puissance de l'appareil.*	*Tension d'essai.*
Au dessous de 400 volts	Au dessous de 10 kW	1000 volts
» »	10 kW et au dessus	1500 »
400 volts à 800 volts	Au dessous de 10 kW	1500 »
» »	10 kW et au dessus	2000 »
800 volts à 1200 volts	»	3500 »
2500 volts et au dessus	»	Double du voltage normal.

Les condensateurs sont essayés au double de la tension et de la fréquence auxquelles ils doivent fonctionner.

La table suivante renseigne les distances explosives dans l'air entre deux pointes d'aiguilles opposées, pour différentes tensions sinusoïdales.

Kilovolts efficaces.	*Distance en cm.*	*Kilovolts efficaces.*	*Distance en cm.*
5	0,57	60	11,8
10	1,19	70	14,9
15	1,84	80	18,0
20	2,54	90	21,2
25	3,3	100	24,4
30	4,1	110	27,3
35	5,1	120	30,1
40	6,2	130	32,9
45	7,5	140	35,4
50	9,0	150	38,1

Valeur nominale. — Les puissances sont habituellement exprimées en kilowatts. La puissance nominale des appareils à courants alternatifs se rapporte à une charge non inductive, c'est à dire avec le courant et la tension aux bornes en coïncidence de phase. On peut exprimer cette puissance apparente nominale en kilovolts-ampères pour la distinguer de la puissance réelle évaluée en kilowatts. On joint souvent à l'expression de la puissance apparente nominale en kilovolts-ampères la valeur normale du facteur de puissance.

Valeurs des surcharges. — Toutes les garanties sont, à moins de conventions contraires, applicables à la charge nominale. Les appareils doivent être capables de supporter une surcharge raisonnable sans être endommagés par échauffement ou étincelles.

Il faut qu'avec les surcharges suivantes la température ne dépasse que de 15° C celle spécifiée pour la charge normale :

Pour les génératrices, 25 pour 100 pendant une demi-heure ;

Pour les moteurs, 25 pour 100 pendant une demi-heure ; 50 pour 100 pendant une minute ;

Commutatrices, 50 pour 100 pendant une demi-heure ;

Transformateurs, 25 pour 100 pendant une demi-heure.

Chapitre XXXII.

GÉNÉRATEURS ET MOTEURS A COURANT CONTINU.

Essais antérieurs à la construction d'une dynamo. — Avant la construction d'une dynamo, il est essentiel de mesurer la conductibilité électrique des fils de cuivre employés dans les enroulements, ainsi que la perméabilité magnétique des métaux constituant la carcasse de la machine. Le fer utilisé pour l'induit doit, en outre, être essayé au point de vue de la perte par hystérésis.

Lorsqu'on étudie un nouveau type de machine, il est nécessaire de déterminer la distribution du flux magnétique, afin de calculer le coefficient de perte de flux entrant dans l'équation du circuit magnétique, établie suivant la méthode de MM. Hopkinson.

Cette détermination peut se faire avant le bobinage de l'armature. Considérons une machine dont les inducteurs sont formés par un électro-aimant en fer à cheval, dans lequel on distingue les noyaux qu'on entoure de bobines magnétisantes provisoires, la culasse et les pièces polaires. Cet électro-aimant constitue avec son armature mobile un circuit magnétique traversé par le flux dû

à l'action du courant qu'on fait passer dans les bobines. Si *mi* est le nombre d'ampères-tours de celles-ci, la force magnétomotrice est $4\pi mi \times 10^{-1}$.

Le flux est confiné en majeure partie dans la carcasse de la machine ; toutefois, comme celle-ci est environnée d'air, de cuivre et d'autres substances perméables dans une certaine mesure aux lignes de force, il s'ensuit des dérivations de flux assez complexes, qui se produisent particulièrement autour de l'induit, entre les pièces polaires. Pour déterminer les pertes de flux correspondant à l'excitation normale de l'électro-aimant, obtenue au moyen d'une source d'électricité indépendante, on enroule autour du milieu d'une des bobines magnétisantes une spire de fil reliée à un galvanomètre balistique. En supprimant brusquement le courant excitateur, on obtient dans le galvanomètre une élongation permettant d'évaluer la quantité d'électricité induite et, par conséquent, la variation du flux magnétique à travers les noyaux. Cette variation représente le flux total diminué du flux remanent. Ce dernier est minime et peut être négligé dans la comparaison qui va suivre.

On répète la même expérience à l'aide de spires enroulées autour de la culasse, des pièces polaires et de l'induit. Les rapports des élongations correspondantes, accusées par le galvanomètre balistique, à celle obtenue dans la première expérience sont égaux aux rapports des flux dans les diverses parties de la machine au flux à travers les noyaux. La variation de surface des spires d'essai est du reste indifférente, si la résistance du circuit de décharge peut être considérée comme constante.

Le rapport entre le flux dans les noyaux et le flux à travers l'induit varie de 1,2 à 2 suivant les types de machines.

Essais effectués après la construction. — Les essais effectués après la construction d'une dynamo comportent la mesure des résistances des diverses parties du circuit électrique, la vérification de l'isolement et de la valeur diélectrique, la détermination du rendement, le relevé de la température limite atteinte après la durée normale de fonctionnement de la dynamo, enfin l'évaluation des pertes intérieures par effet Joule, courants de Foucault, hystérésis et frottements.

Dans les machines à courant continu les pertes qui doivent être ajoutées à la puissance utile pour obtenir la puissance totale absorbée et permettre ainsi l'évaluation du rendement, se décomposent comme suit :

a) pertes par frottement dans les coussinets et sous les balais et par ventilation ;

b) pertes par hystérésis dans le fer et par courants de Foucault dans le fer et dans le cuivre ; ces pertes doivent être déterminées avec la vitesse et le flux normaux de l'induit, ainsi qu'on le verra ci-après dans la description des méthodes d'essai ;

c) pertes par effet Joule dans l'induit, qui comprennent les pertes dues à la résistance de contact des balais, laquelle est relativement élevée avec les frotteurs en charbon ;

d) pertes par effet Joule dans les inducteurs ; si le rhéostat d'excitation fait partie essentielle de la machine et n'en peut être distrait dans le fonctionnement normal, il faut comprendre la perte par effet Joule dans cet instrument.

Dans les transformateurs rotatifs le rendement est, comme précédemment, le rapport de la puissance débitée à la puissance reçue.

Mesure des résistances électriques d'une dynamo. — Il convient de mesurer les résistances électriques des diverses parties d'une dynamo à chaud, après que la machine a pris sa température de régime. La résistance à chaud doit être déterminée pour permettre l'évaluation de pertes par effet Joule de la machine en service normal.

Les parties du circuit électrique qui présentent une résistance assez élevée, comme l'enroulement des inducteurs d'une machine en dérivation, peuvent être mesurées à l'aide d'un pont de Wheatstone. Les parties de résistance faible sont mesurées avec plus d'exactitude par le pont de Kelvin ou par une méthode analogue.

Le plus souvent, on envoie dans la résistance à mesurer le courant d'une batterie d'accumulateurs et l'on prend le rapport des

indications d'un voltmètre et d'un ampèremètre mesurant la différence de potentiel aux bornes du circuit essayé ainsi que l'intensité du courant. Ces appareils sont moins exposés aux accidents, dus aux fausses manœuvres de commutateurs, que les ponts composés de bobines à fil fin, qu'une élévation brusque du courant peut mettre hors de service.

Un autre moyen employé pour la détermination des résistances faibles consiste à faire le rapport des lectures relevées sur l'échelle d'un galvanomètre de grande résistance, relié successivement aux bornes du circuit à l'essai et aux bornes d'une résistance étalon traversée par le même courant.

La mesure de la résistance d'un induit exige certaines précautions. Il convient de comprendre dans cette résistance celle des balais, dont le contact avec le collecteur occasionne parfois une chute de tension notable, surtout avec les frotteurs en charbon ; ce fait doit être pris en considération dans l'évaluation des pertes par effet Joule. Il faut répéter la mesure pour diverses positions occupées par les balais sur le collecteur, les ressorts de pression étant réglés à la tension normale ; on prend la moyenne des résultats obtenus.

Isolement et valeur diélectrique. — On doit vérifier la résistance d'isolement de la machine après échauffement de celle-ci à la température de régime, car l'isolement diminue rapidement lorsque la température s'élève. Pour cela, on adopte l'une des méthodes suivies pour la mesure des hautes résistances, en appliquant une tension d'essai égale à la tension de régime de la dynamo. Dans le cas de machines développant de hautes tensions, il est nécessaire de recourir à l'emploi de petits transformateurs ou de petites dynamos continues de haut voltage pour cette vérification. Les dynamos nouvellement construites présentent un isolement faible à cause de l'humidité qui imprègne les isolants. On peut les sécher soit à l'étuve, soit par un courant électrique obtenu en excitant séparément la machine et en la faisant tourner lentement dans un circuit peu résistant, de manière à ne lui faire produire qu'une force électromotrice réduite.

La valeur diélectrique se vérifie à l'aide d'un transformateur. La

tension efficace d'essai, dont la valeur dans les divers cas a été indiquée au chapitre précédent, est appliquée pendant une minute et vérifiée par un voltmètre électrostatique. Un plomb est intercalé dans le primaire du transformateur, afin d'interrompre le courant si le diélectrique est percé. On évite les tensions excessives par un circuit dérivé de sûreté, présentant des aiguilles écartées à une distance telle qu'une étincelle éclate pour un voltage supérieur de 10 pour 100 au voltage spécifié.

Vérification d'un induit. — Pendant la rotation de l'induit d'une dynamo bipolaire, les potentiels des lames du collecteur vont en croissant des deux côtés de la ligne neutre, à partir du balai négatif jusqu'au balai positif. Supposons le balai négatif maintenu au potentiel zéro par une liaison électrique avec le sol, tandis que le balai positif est isolé, et portons, sur le prolongement des rayons du collecteur passant par les diverses lames, des longueurs proportionnelles aux potentiels de celles-ci ; nous obtiendrons une courbe du genre de celle représentée dans la fig. 209, comprenant deux branches symétriques par rapport à la ligne neutre de la machine. Pour déterminer rapidement les points de la courbe, le balai négatif

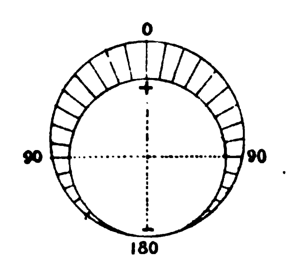


Fig. 209.

est relié à l'une des bornes d'un voltmètre dont la seconde borne communique avec un petit balai auxiliaire. On appuie ce dernier sur le collecteur en l'écartant progressivement du balai négatif et en réglant les écarts de manière à insérer successivement les diverses sections de l'induit dans le circuit du voltmètre. Les déviations de celui-ci accusent les différences de potentiel entre le balai négatif

et les lames du collecteur et mesurent les ordonnées de la courbe polaire ci-dessus. Cette méthode permet de vérifier la symétrie du champ magnétique dans lequel se meut le fil induit. Un défaut de symétrie est immédiatement accusé par une déformation de la courbe des potentiels.

La même méthode appliquée à un induit multipolaire enroulé en quantité permet de vérifier si les divers enroulements dérivés développent les mêmes forces électromotrices. Très souvent, en effet, par suite d'une différence entre les inducteurs ou d'un décentrage de l'induit, on constate des inégalités entre les forces électromotrices susceptibles de produire des courants dans l'induit tournant à circuit ouvert, avec les bornes de même polarité réunies. On constate ces inégalités en reliant deux balais de même polarité par un ampèremètre, qui accuse le courant dû à la différence de potentiel de ces balais.

On peut vérifier directement l'inégalité des flux inducteurs correspondants en se servant, d'après la méthode de M. Hopkinson, d'un galvanomètre balistique relié à une spire de fil qu'on enroule successivement autour des divers noyaux. Parfois l'inégalité d'action des inducteurs tient à des différences dans les ampères-tours des divers électro-aimants. On peut comparer rapidement les chutes de potentiel dans les diverses bobines excitatrices, si celles-ci sont réunies en série, et constater ainsi immédiatement une différence saillante entre ces bobines.

Pour vérifier les diverses sections d'un induit, on fixe celui-ci et on y envoie par les balais un courant constant. Un voltmètre sensible est relié par deux frotteurs aux lames contigües du collecteur; les différences de potentiel doivent être égales. Un court-circuit dans une section s'accuse par une différence de potentiel réduite.

Au contraire, une interruption dans l'induit maintient le voltmètre au zéro, jusqu'au moment où les frotteurs touchent les deux lames correspondant à la section dans laquelle le fil est coupé.

S'il y a plusieurs interruptions, le voltmètre reste au zéro pour toutes les positions des deux frotteurs, lorsque ceux-ci sont à la dis-

tance de deux lames voisines du collecteur. Mais, en écartant progressivement les frotteurs, il arrive un moment où la déviation se produit en décelant les points défectueux.

Détermination directe du rendement d'une dynamo par la combinaison de mesures mécaniques et de mesures électriques. — Le procédé direct de détermination du rendement industriel consiste à mesurer, par des essais mécaniques, la puissance effective appliquée à l'arbre de la dynamo en même temps qu'on estime les watts disponibles aux bornes.

Le travail mécanique absorbé par la dynamo est déduit des diagrammes d'indicateur relevés sur la machine à vapeur. On a vu précédemment, qu'eu égard aux faibles différences entre les frottements d'une machine à vapeur en charge et à vide, on peut admettre dans un essai approximatif que le travail effectif d'une telle machine est égal à la différence entre le travail indiqué en charge et le travail indiqué à vide pour une même vitesse. Si la machine à vapeur attaque indirectement la dynamo, on peut encore considérer, dans une première approximation, que les frottements des organes intermédiaires sont indépendants de la charge. Il est bien entendu que la vitesse doit être constante pendant ces essais, ainsi que la lubrification des organes mobiles. On attendra que les machines aient tourné pendant un temps suffisant pour que les graisses et huiles employées aient pris leur fluidité normale, ces graisses offrant parfois à froid une résistance très supérieure à la résistance en marche normale. L'importance de la constance de la vitesse est particulièrement grande dans la marche à vide ; eu égard au faible travail effectué dans ces conditions, le volant apporte, pendant un ralentissement d'allure, un appoint important au travail de la vapeur et, au contraire, lors d'une accélération de vitesse, la vapeur doit fournir, outre le travail des frottements, le travail, souvent plus important, nécessaire pour vaincre l'inertie du volant.

On obtient une mesure plus exacte du travail réellement utilisé par la dynamo en substituant à celle-ci un frein qui absorbe le travail de la machine à vapeur dans les mêmes conditions d'admission et de vitesse.

Les dynamomètres de transmission offrent un autre moyen de mesurer le travail transmis.

Eu égard à la difficulté de séparer exactement les pertes dans le moteur des pertes dans la dynamo, on convient souvent, dans le cas du couplage direct, de ne mesurer que le rapport de la puissance électrique utile à la puissance indiquée aux cylindres du moteur. Ce rapport est le *rendement combiné* des deux machines.

S'il s'agit de dynamos attaquées par des turbines à eau ou à vapeur, on détermine l'eau ou la vapeur dépensée, sous la pression indiquée, par kilowatt-heure utile recueilli aux bornes de la dynamo.

Les mesures électriques qui accompagnent les mesures mécaniques sont la détermination du voltage aux bornes de la dynamo, la mesure de l'intensité du courant utile et, éventuellement, le relevé de l'intensité du courant dans le circuit dérivé des inducteurs. La machine est mise en circuit avec des résistances telles que des lampes à incandescence ou les résistances artificielles pour courants intenses décrites précédemment ([1]).

Si l'on est obligé de faire l'essai pendant que la dynamo alimente des moteurs électriques ou d'autres récepteurs à marche variable, il convient, pour obtenir quelque précision, de faire de nombreuses expériences permettant de prendre des moyennes.

Les relevés à l'indicateur, au compte-tours, au voltmètre et à l'ampèremètre doivent être simultanés, afin de donner la puissance utile et la puissance absorbée correspondantes. Un observateur relève par exemple la vitesse et frappe sur un timbre au moment où le régime normal est atteint. Aussitôt, d'autres observateurs font, en même temps, les constatations électriques et mécaniques.

La mesure de la vitesse est une de celles qui entraînent les erreurs les plus fortes, si l'on borne l'observation à une période

([1]) Lorsqu'on mesure la différence de potentiel aux bornes des machines par un voltmètre, il faut avoir soin de couvrir ce dernier par une clef d'interruption, pour éviter qu'il ne soit traversé par l'extra-courant des inducteurs lorsqu'on ouvre le circuit principal.

trop courte. On obtient de bons résultats, avec les machines à vapeur de faible et de moyenne vitesse, en fixant un compte-tours à l'arbre et en notant le nombre de révolutions pendant toute la durée de la série d'essais effectués sous un même régime de charge. En divisant ce nombre par le temps, on obtient la vitesse moyenne plus exactement qu'en appliquant un compte-tours à pointeau pendant une minute sur l'extrémité de l'arbre.

Pour l'essai d'une dynamo, il est bon d'établir successivement divers régimes de courant, en maintenant la vitesse invariable et en changeant la résistance extérieure. Pour chaque valeur nouvelle du courant, on fait des lectures, également espacées, à chacun des appareils de mesure électrique, pendant qu'on relève les diagrammes d'indicateur, afin de pouvoir calculer la puissance électrique moyenne correspondant à la puissance mécanique. Il est d'ailleurs utile de répéter plusieurs fois l'ensemble des essais pour chaque régime, afin de prendre des moyennes et de réduire les erreurs accidentelles assez grandes auxquelles de telles observations sont sujettes. On termine la série des mesures en relevant la puissance absorbée pour faire tourner la dynamo avec son excitation seule.

On a ainsi toutes les données nécessaires pour établir les courbes de variation du rendement industriel ou du rendement combiné en fonction de la puissance utile.

Cette méthode de mesure du rendement d'une dynamo est sujette, il ne faut pas se le dissimuler, à des causes d'erreur assez grandes. Les essais mécaniques ne comportent généralement pas la même précision que les mesures électriques, et la puissance absorbée étant obtenue par différence entre la puissance indiquée en charge et la puissance indiquée à vide, des erreurs de sens opposés sur les quantités précédentes peuvent apporter dans l'estimation de la différence une erreur importante. On ne s'étonnera pas de trouver des différences de 2 pour 100 entre des mesures de cet ordre effectuées avec des appareils différents par divers observateurs. Lorsqu'on étudie le rendement combiné d'un moteur à vapeur et d'une dynamo, on peut obtenir plus de précision, d'autant plus qu'on a un contrôle en déterminant le poids de vapeur dépensée par kilowatt-heure utile.

Pour atteindre une exactitude plus grande, on peut, lorsqu'on dispose d'une source d'électricité indépendante, admettre l'égalité des rendements d'une dynamo fonctionnant successivement comme générateur et comme moteur, hypothèse sensiblement exacte lorsqu'on n'a pas affaire à de très petites machines. Il suffit d'un essai au frein de Prony pour obtenir le rendement industriel d'un électromoteur, rendement qui est égal au rapport entre la puissance restituée à la poulie et la puisance électrique absorbée.

On remarquera qu'un générateur dont le rendement industriel a été déterminé au préalable dans diverses conditions de vitesse, de courant et de différence de potentiel aux bornes constitue un excellent frein pour l'étude des moteurs électriques et autres, car il suffit d'une lecture à l'ampèremètre et au voltmètre pour estimer la puissance absorbée par ce frein. Une dynamo peut d'ailleurs fonctionner indéfiniment, tandis qu'un frein ordinaire exige des soins particuliers qui rendent difficiles les expériences de longue durée. Les petites dynamos ne sont pas à recommander comme freins, par suite de la proportion relativement grande du travail absorbé par les frottements des balais et des tourillons, frottements susceptibles de varier dans des limites assez étendues, suivant la pression des balais et le graissage. Pour les puissances faibles, on a construit des freins constitués par des dynamos sans balais dont l'induit est un disque de cuivre. On mesure le couple résistant de ces freins électriques en rendant les inducteurs mobiles autour d'un axe et en équilibrant le couple, qui tend à entraîner ceux-ci dans le mouvement de l'induit, par des poids, comme dans le frein de Prony.

Les méthodes permettant de mesurer le rendement des machines par des essais purement électriques sont susceptibles de donner une exactitude plus grande que les méthodes précédentes, surtout quand on emprunte le courant à une batterie d'accumulateurs suffisamment puissante. Ce sont les méthodes actuellement le plus en faveur parmi les électriciens. Toutefois, il faut reconnaître que, lorsqu'on désire apprécier les frottements et éprouver la solidité des paliers, rien ne remplace un essai direct avec le moteur *ad hoc*, qui permet de juger du fonctionnement de la machine dans les conditions d'utilisation.

Méthode de MM. Hopkinson. — La méthode suivante permet de réduire les erreurs résultant des essais mécaniques en ne mesurant, à l'aide d'un dynamomètre, que l'énergie absorbée par les pertes intérieures des dynamos. Si ces pertes représentent 10 pour 100 de l'énergie utile et si l'on commet une erreur de 5 pour 100 dans la mesure dynamométrique, on peut encore estimer le rendement des machines à 0,5 pour 100 près.

La méthode repose sur l'hypothèse de l'égalité des rendements de deux dynamos identiques couplées et fonctionnant l'une comme génératrice et l'autre comme moteur, le courant de la première étant envoyé dans la seconde. L'énergie mécanique nécessaire pour entretenir les deux machines en marche normale est alors égale à la somme des pertes intérieures des deux dynamos.

Celles-ci sont manchonnées après que leurs arbres ont été placés dans le prolongement l'un de l'autre. Si l'on n'est pas certain de maintenir l'alignement des deux axes, il faut, pour éviter les frottements exagérés sur les coussinets, se servir d'un accouplement élastique tel qu'un manchon Raffard ou d'un ressort à boudin en acier. Les deux dynamos sont commandées par une courroie, sur laquelle on dispose un dynamomètre de transmission.

Lorsque les deux dynamos sont excitées en dérivation, leur couplage électrique n'offre aucune difficulté et il est aisé de régler les excitations, par des rhéostats de champ magnétique, de manière que l'une des machines développe une force électromotrice plus grande que celle de l'autre et fasse fonction de générateur; son courant passe dans la seconde machine qui fait l'office de moteur. On fait en sorte que les deux dynamos soient traversées par les courants normaux. Lorsqu'elles sont à excitation en série ou à excitation composée, il est plus simple d'exciter les inducteurs par une source indépendante, de manière à éviter les renversements de pôles qui peuvent résulter de fausses manœuvres.

Pour que la puissance moyenne des deux dynamos représente la puissance normale de ces machines, il faut nécessairement que le générateur fonctionne au delà de la charge normale et le moteur en deçà de cette charge. Le premier des appareils absorbe donc une puissance égale à la puissance normale augmentée de ses pertes intérieures, tandis que le second restitue la même puissance

diminuée des pertes intérieures qui lui sont propres. Avec des machines assez fortes pour que les pertes ne représentent que 10 pour 100 de la puissance utile, la surcharge n'offre pas d'inconvénient et, dans les conditions ci-dessus, le rendement ne diffère pas sensiblement du rendement sous la charge normale, la courbe du rendement présentant, en général, peu de variations au voisinage de cette charge.

La puissance $2p$, mesurée à l'aide du dynamomètre de transmission, représente les échauffements dus aux effets mécaniques, électriques et magnétiques dans les deux machines. Dans l'hypothèse de l'égalité des rendements de celles-ci, la part qui revient à chacune des machines est p. Par suite, en appelant P la puissance électrique mesurée aux bornes communes, le rendement de la génératrice a pour expression

$$\eta = \frac{P}{P + p}.$$

Cette méthode permet d'essayer des dynamos de grande puissance avec un moteur et un dynamomètre relativement faibles, attendu qu'il n'y a guère à fournir et à mesurer que le cinquième de la puissance d'une des dynamos.

On peut, par ce procédé comme par quelques uns des suivants, estimer la perte dans une transmission par courroie. On commence par coupler directement les dynamos, puis on les réunit par l'intermédiaire d'une courroie : la différence des puissances mesurées dans les deux cas au dynamomètre indique la perte cherchée. A l'essai dynamométrique, on peut substituer une mesure à l'aide de diagrammes d'indicateur, si le moteur est à vapeur.

Enfin, si l'on dispose d'un moteur électrique dont on connaît le rendement sous diverses charges, le mieux est de s'en servir pour attaquer les deux dynamos par un accouplement direct. Ce système permet de substituer à la mesure mécanique des pertes qu'entraînent celles-ci, la mesure électrique de la puissance absorbée par l'électromoteur auxiliaire. Cette puissance représente les pertes dans ce dernier et dans les deux machines principales.

Méthode de MM. Fontaine et Cardew. Cas des moteurs de tramway. — Il est aussi possible, comme l'ont montré séparément M. Fontaine et M. Cardew, de supprimer toute mesure dynamométrique lorsqu'on dispose d'une troisième dynamo ou d'une batterie d'accumulateurs suffisante. Dans ce cas, les deux dynamos identiques à essayer, ayant leurs arbres couplés comme dans la méthode précédente, sont reliées l'une à la source auxiliaire, l'autre à un circuit formé de résistances artificielles. La première machine tournant comme moteur actionne la seconde qui sert de générateur. Le rapport entre les watts recueillis aux bornes de celui-ci et les watts fournis au moteur est approximativement égal au carré du rendement de chacun des appareils. Si l'on se sert des mêmes instruments pour effectuer les deux séries de mesures électriques, le résultat ne dépend pas de l'exactitude de l'étalonnage de ces appareils. Il suffit que les indications de ceux-ci soient rigoureusement proportionnelles pour obtenir la valeur exacte du rendement combiné. De plus, une erreur due à ces instruments est atténuée par cette circonstance que le résultat cherché dépend de la racine carrée des lectures.

Comme dans la méthode précédente, il faut faire fonctionner les deux machines sous des régimes de courant aussi voisins que possible du courant de service, la différence de potentiel appliquée au moteur dépassant la tension normale d'une quantité à peu près égale à l'excès de la tension normale sur la différence de potentiel fournie par la machine génératrice.

Cette méthode permet d'essayer sans difficulté les dynamos quel que soit leur mode d'excitation; celui-ci peut différer dans les deux machines. De plus, on peut étudier par ce procédé des dynamos construites pour des voltages différents, pourvu que la puissance et la répartition des pertes intérieures des deux appareils soient les mêmes.

La méthode est usitée pour essayer les moteurs de tramway, dont on mesure ordinairement le rendement en comprenant dans les pertes intérieures les frottements du train d'engrenages. On accouple deux moteurs par l'intermédiaire d'un faux essieu portant une roue dentée de chaque côté de laquelle engrène le pignon d'un moteur. Une des machines est reliée à la distribution, tandis que l'autre fonctionne sur un rhéostat,

La méthode dont il s'agit a l'inconvénient d'exiger une source de courant auxiliaire capable de développer une puissance supérieure à celle des dynamos essayées. Si l'on utilisait le courant produit par la seconde machine à l'essai pour aider la source auxiliaire, on pourrait réduire l'importance de celle-ci à la puissance perdue dans les deux dynamos et déterminer le rendement de machines de grande puissance au moyen d'une dynamo ou d'une batterie d'accumulateurs relativement faible.

Méthode de Lord Rayleigh et de M. Kapp. — C'est ce qu'ont fait Lord Rayleigh et M. Kapp. Désignons par D_1 et D_2 les deux machines à essayer, supposées excitées en dérivation. On les accouple mécaniquement en observant les recommandations faites

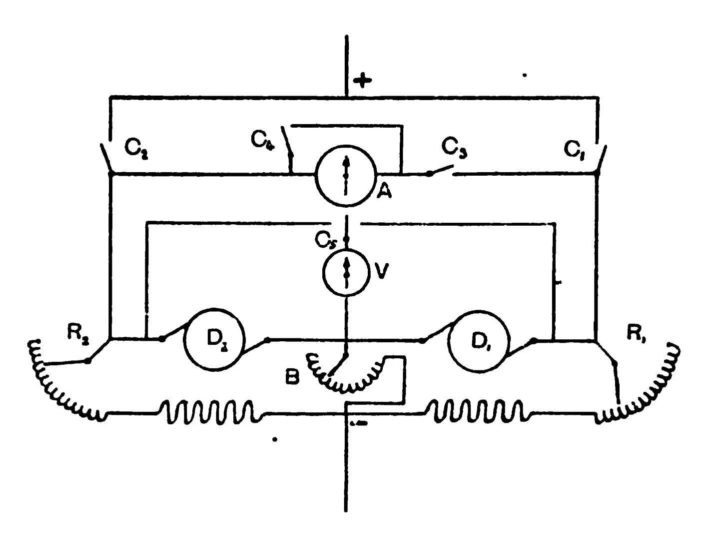


Fig. 210.

à propos de la méthode de MM. Hopkinson et l'on dispose leurs circuits électriques comme l'indique la fig. 210, dans laquelle R_1 et R_2 désignent les rhéostats de champ magnétique, B un rhéostat de démarrage, C_1, C_2, C_3, C_4 et C_5 des clefs de circuit, A un ampèremètre et V un voltmètre. Soit D_1 la dynamo choisie

comme moteur, le choix étant indifférent puisque tout est symétrique. On ferme la clef C_1 et l'on met D_1 en marche à vide, à l'aide du rhéostat de démarrage. On règle la vitesse du moteur au moyen du rhéostat R_1. On excite ensuite la dynamo D_2 et l'on règle le rhéostat R_2, jusqu'à ce que D_2 donne sensiblement la même différence de potentiel que D_1, ce qu'on vérifie à l'aide du voltmètre V.

Lorsque ce résultat est atteint, l'induit D_2 n'est traversé que par un courant minime au moment où l'on ferme la clef C_3, qui couple les dynamos en parallèle. Suivant qu'on ferme la clef C_1 ou la clef C_2, l'ampèremètre indique le courant débité par le générateur ou le courant absorbé par le moteur. La différence mesure le supplément de courant emprunté à la source auxiliaire. L'emploi d'un même ampèremètre et d'un même voltmètre pour les deux machines réduit au minimum les erreurs qu'entraînent les mesures. La clef C_4 sert à mettre l'ampèremètre en court-circuit, s'il est susceptible de s'échauffer d'une manière anormale par le passage continu du courant.

On augmente graduellement l'excitation de D_2 jusqu'à ce que le courant I_2, débité par cette machine, soit en deçà de l'intensité du courant de régime d'une quantité égale à l'excédent, sur celui-ci, du courant I_1, absorbé par le moteur.

On lit à diverses reprises les courants I_1 et I_2, en manœuvrant alternativement les clefs C_1 et C_2. On mesure simultanément les voltages V_1 et V_2 en déplaçant le commutateur C_5 ; ces voltages diffèrent légèrement à cause de la résistance des fils de connexion, de la clef C_3 et de l'ampèremètre.

Le rapport $\frac{V_2 I_2}{V_1 I_1}$ est sensiblement égal au carré du rendement industriel de chaque dynamo.

Si les voltages sont très peu différents, on a simplement

$$\eta = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}.$$

La disposition décrite ne s'applique bien qu'aux dynamos excitées en dérivation. Avec les dynamos à excitation en série ou composée, la mise en parallèle peut occasionner des renversements

de pôles et des courants excessifs. Déjà dans le cas des dynamos en dérivation, il faut être très circonspect pour ne pas faire de fausses manœuvres.

On préfère souvent laisser les circuits d'excitation en dehors des connexions principales et traiter les dynamos comme des machines à excitation indépendante, quel que soit le mode d'enroulement des inducteurs. Il est toujours possible d'estimer la dépense par effet Joule dans ceux-ci, en mesurant leurs résistances à chaud ainsi que l'intensité des courants qui les traversent ou les différences de potentiel qui leur sont appliquées. Ce procédé a même l'avantage avec les machines en dérivation, de ne pas faire entrer en ligne de compte, comme cela a lieu dans la disposition précédente, la dépense d'énergie dans les rhéostats d'excitation.

Si i_1 et i_2 désignent les courants dans les induits et si, d'autre part, on a mesuré les pertes par effet Joule W_1 et W_2 dans les inducteurs des machines, on a pour expression du rendement

$$\eta = \sqrt{\frac{V_2 i_2 - W_2}{V_1 i_1 + W_1}}.$$

De l'essai précédent, on peut déduire les pertes par hystérésis, H, par courants de Foucault, C, et par frottements, F, dans chaque dynamo. En supposant la répartition égale entre les deux machines et en appelant R_a la résistance des induits à chaud,

$$H + C + F = \frac{1}{2}(V_1 i_1 - V_2 i_2) - \frac{1}{2} R_a (i_1^2 + i_2^2).$$

La méthode peut encore être appliquée à des machines ayant des excitations identiques et couplées en parallèle, à la condition d'introduire dans le circuit de l'induit de l'une d'elles quelques éléments secondaires en opposition pour réduire la force électromotrice. Ce procédé convient aux machines à inducteur unique et à deux induits, telles que certaines dynamos actionnées par les turbines de Laval.

Dans les combinaisons indiquées ci-dessus, la source auxiliaire doit fournir la même différence de potentiel que les dynamos essayées. Si celles-ci sont construites pour produire un voltage

très élevé, on peut, au lieu de les relier en parallèle par rapport à la source auxiliaire, les mettre en série avec cette dernière, en ayant soin d'exciter séparément les inducteurs, pour éviter tout accident, et en opposant les forces électromotrices des armatures. La source auxiliaire doit alors débiter un courant égal à celui qui circule dans les induits des deux machines et suppléer à la différence entre la tension V_2 fournie par la génératrice et celle V_1 nécessaire à l'électromoteur.

Abstraction faite de l'excitation, le rendement est alors

$$\eta = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}}.$$

Méthode de M. Swinburne. — M. Swinburne a suggéré une méthode d'essai très rapide, dont on peut déduire le rendement d'une dynamo sous diverses charges, et qui n'exige qu'une source d'électricité auxiliaire suffisante pour faire fonctionner la machine à vide.

Le procédé repose sur l'hypothèse de la constance des pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault d'un moteur électrique à vide et en charge, pour un flux magnétique donné à travers l'induit, et sur l'égalité des rendements d'une dynamo fonctionnant comme moteur et comme générateur.

Considérons, par exemple, une génératrice en série donnant, à la vitesse normale de N tours par seconde, une différence de potentiel aux bornes v et un courant i. Le rendement de la machine a pour expression

$$\eta = \frac{vi}{vi + (r_a + r_s)\, i^2 + a}, \qquad (1)$$

r_a, r_s et a représentant respectivement la résistance de l'induit, celle des inducteurs et les pertes par frottements, par courants de Foucault et par hystérésis.

$$a = F + C + H.$$

La force électromotrice totale que la dynamo développe en marche normale est

$$e = v + i\,(r_a + r_s).$$

Pour déterminer a, on envoie dans les inducteurs un courant indépendant, d'intensité telle que la dynamo, tournant comme moteur à vide à la vitesse N, produise la même force électromotrice e. Soit i' le courant très faible qui passe dans l'induit. La différence de potentiel aux bornes est

$$v' = e + i' r_a;$$

le second terme est généralement négligeable devant le premier.

Le flux à travers l'induit est alors le même que lorsque la machine fonctionne en charge, car on a

$$\mathcal{N} = \frac{e \times 10^8}{n\mathrm{N}},$$

n étant le nombre de fils à la périphérie de l'induit. Dans ces conditions, les pertes par hystérésis à vide sont les mêmes qu'en charge ; les pertes par frottements sont également peu différentes, les frottements variant dans de très faibles proportions avec la charge. Les pertes par courants de Foucault seules sont sensiblement plus élevées en charge qu'à vide, par suite de la déformation du champ qui, en charge, rend les variations du flux magnétique plus brusques ; en outre, dans les machines à anneau, le courant circulant dans les parties intérieures des spires de l'induit développe un champ dans le vide de l'anneau, ce qui produit en charge des courants de Foucault dans les supports de l'armature et dans l'arbre mobile. Néanmoins, pour une première approximation, on peut admettre que les pertes à vide sont égales à celles en charge et que ces dernières sont mesurées par

$$i' e = a.$$

On a donc pour la valeur approchée du rendement

$$\eta = \frac{vi}{vi + (r_a + r_s) i^2 + ei'}. \qquad (2)$$

Dans le cas d'une machine en dérivation, dont l'inducteur de résistance r_d est traversé en charge par un courant i_d, on aurait

$$\eta = \frac{vi}{vi + r_a (i + i_d)^2 + r_d i_d^2 + ei'}. \qquad (2')$$

On remarquera que cette méthode est analogue à celle qui consiste à déterminer le rendement d'une machine à vapeur par la mesure de la puissance indiquée lorsque la machine tourne à vide.

S'il s'agit d'un électromoteur et non d'une dynamo génératrice, on doit prendre pour v la tension normale appliquée aux bornes de la machine, pour i le courant total absorbé, et l'on a alors, pour le rendement d'un moteur en dérivation par exemple,

$$\eta = \frac{vi - r_a (i - i_d)^2 - r_d i^2_d - ei'}{vi} \quad (3).$$

La méthode de M. Swinburne permet d'estimer le rendement non seulement en pleine charge, mais à toutes charges.

Les appareils de mesure exigés pour l'exécution de cette méthode se réduisent à un voltmètre, un ampèremètre et un compte-tours pour relever la vitesse.

Il convient, pour obtenir des résultats précis, de faire usage d'une batterie d'accumulateurs comme source auxiliaire, afin de maintenir le courant d'essai bien constant, à moins qu'on ne dispose d'une dynamo génératrice conduite par un moteur absolument régulier, et encore, dans ce dernier cas, une certaine circonspection est-elle nécessaire. On évitera, par exemple, d'essayer un moteur en dérivation puissant à l'aide d'une petite génératrice en série, car les variations de vitesse amenées par les réactions d'inertie du moteur électrique sont susceptibles d'occasionner un renversement de sens du courant dans la génératrice.

A part l'erreur due à l'inconstance des pertes, la méthode précédente est très précise, parce que la mesure porte uniquement sur la puissance perdue dans la dynamo, c'est à dire sur la différence entre la puissance absorbée et la puissance utile. Si la différence représente 10 pour 100 de cette dernière, par exemple, et peut être estimée à 2 pour 100 près, à l'aide du voltmètre et de l'ampèremètre, le rendement trouvé est exact à 0,2 pour 100.

Un léger écart de la vitesse N du moteur marchant à vide a très peu d'influence sur le courant i' mesuré, attendu que

$$i' = \frac{v' - e}{r_a},$$

et que la force contre-électromotrice e varie sensiblement comme

ν' avec la vitesse; une variation de vitesse de 4 à 5 pour 100 n'apporte pas de modification sensible dans la valeur de i'.

Lorsque les valeurs ν, i et N sont indiquées par le constructeur, il est bon de vérifier si la machine est capable de fonctionner dans ces conditions, sans échauffements excessifs.

Il résulte de la comparaison entre les résultats fournis par la méthode de Lord Rayleigh et de M. Kapp et ceux obtenus par la méthode de M. Swinburne que la première conduit à un rendement un peu trop faible, parce que les deux dynamos employées fonctionnent l'une au dessus, l'autre au dessous de la puissance normale, l'écart étant d'autant plus grand que le rendement est moindre; tandis que la seconde méthode amène un résultat trop fort, attendu que les pertes a croissent avec la charge. Dans le cas de machines puissantes, ayant un grand rendement, si l'on veut obtenir une valeur plus approchée de celui-ci, on prendra, pour $a = H + C + F$, la moyenne entre les résultats fournis par les deux méthodes.

Application des deux méthodes précédentes. — Voici les résultats d'un essai de deux moteurs D_1 et D_2, de construction identique, excités en dérivation et devant développer une puissance voisine de 10 chevaux, au régime de 114 volts, 75 ampères et 900 tours par minute.

Les appareils de mesure étaient un voltmètre Weston pour lire les tensions et un millivoltmètre, dérivé sur 0,01 ohm, pour déterminer les intensités. Ces deux appareils avaient été étalonnés au préalable. Les calculs numériques ont été effectués à la règle de 0,52 m.

Les machines, couplées par l'intermédiaire d'un ressort à boudin et reliées électriquement suivant le dispositif de M. Kapp, mais avec excitations indépendantes, ont été maintenues en marche normale pendant deux heures et demie, pour échauffer les circuits. Après cette durée, une série de lectures a donné les moyennes ci-dessous:

Moteur D_1 : $i_1 = 86,2$; $V_1 = 113,97$; $i_1 V_1 = 9\,825$ watts.
Moteur D_2 : $i_2 = 66,5$; $V_2 = 115,98$; $i_2 V_2 = 7\,717$ watts.

Nombre moyen de révolutions : 1121 par minute.

Il résulte de ces chiffres que

$$H + C + F = \frac{1}{2}(9\,825 - 7\,717) - \frac{1}{2} r_a (\overline{86,2}^2 + \overline{66,5}^2).$$

Pour déterminer la résistance intérieure des armatures, r_a, on y a fait passer, au moment de l'arrêt, un courant mesuré au moyen du millivoltmètre et d'une résistance étalon, la différence de potentiel aux balais étant déterminée par un voltmètre Weston marquant de 0 à 3 volts. La moyenne de 3 déterminations a été 0,061 ohm.

Les inducteurs, mesurés par le même procédé, ont donné 32,95 ohms.

De ce qui précède, on déduit H + C + F = 692,5 watts à 1 121 tours par minute, avec un courant moyen dans l'induit de 76,4 ampères et une force électromotrice moyenne de 114,3 volts, égale à

$$\frac{V_1 - i_1 r_a + V_2 + i_2 r_a}{2}.$$

La méthode de M. Swinburne, appliquée ensuite au moteur D_1, a fourni les résultats suivants :

Volts aux bornes, v'.	Courant à vide, i'.	Tours par minute.
114,2	5,3	1116
114,2	5,3	1117
114,2	5,3	1154

Ces chiffres montrent le peu d'influence d'une variation de la vitesse à vide.

D'après cela, on voit que l'essai Swinburne donne, dans les conditions de vitesse de l'essai Kapp,

$$H + C + F = 606 \text{ watts},$$

l'effet Joule dû au courant de 5,3 ampères pouvant être négligé.

On voit donc que le rapport des pertes trouvées par les deux méthodes est

$$\frac{[H + C + F]_{\text{Kapp}}}{[H + C + F]_{\text{Swinburne}}} = \frac{692,5}{606} = 1,142.$$

Connaissant ce rapport, il suffit d'essayer les moteurs du même type par la méthode de Swinburne dans les conditions indiquées

par le constructeur. Le moteur D_1, par exemple, a été construit pour absorber 114 volts et 75 ampères à 900 tours par minute. Le courant dans l'induit est alors $75 - \frac{114}{32,9} = 71,53$ ampères et la perte en volts dans l'induit atteint 4,36. La force contre-électromotrice est donc 109,64 volts. D'autre part, les résultats de l'essai Swinburne, effectué dans les conditions normales, ont été $v' = 109$; $i' = 4,89$; $N = 895$ tours par minute.

Dans ces conditions, on a donc

Puissance normale absorbée	8 550 watts.
Effet Joule dans l'armature	311 id.
Effet Joule dans l'inducteur	395 id.
H + C + F	537 id.
Pertes totales	1 243 id
Rendement Swinburne $\frac{8550 - 1243}{8550}$, soit	0,855
Rendement Kapp, déduit du précédent en majorant les pertes H + C + F dans le rapport de 1 à 1,142	0,848
Rendement moyen	0,8515

Discussion de la méthode de M. Swinburne. — La formule du rendement industriel d'un électromoteur en dérivation est

$$\eta = \frac{Vi - i_a^2 r_a - i_d^2 r_d - V' i'}{Vi}.$$

V et i définissant les conditions de fonctionnement normales de la machine. On détermine expérimentalement r_a et r_d qui servent à calculer i_a et i_d; soient dr_a et dr_d les erreurs que comportent ces mesures.

Pour que $V'i'$ représente bien les pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault en marche normale, il faut rétablir la même vitesse et la même force électromotrice. Supposons qu'au lieu de réaliser la vitesse N, on opère à $N + dN$ tours et qu'au lieu de la différence de potentiel V' nécessaire pour avoir la même force électromotrice, on ait aux bornes de la dynamo, dans l'essai Swinburne, $V' + dV'$; dN et dV' comprenant les erreurs de lecture. Soit, d'autre part, di' l'erreur commise dans la lecture du

courant. Enfin, supposons que, dans des limites restreintes, le produit $V' i'$ soit proportionnel à la vitesse ; on a

$$i_d = \frac{V}{r_d},$$

$$i_a = i - i_d = i - \frac{V}{r_d},$$

d'où

$$\eta = \frac{Vi - r_a\left(i - \frac{V}{r_d}\right)^2 - \frac{V^2}{r_d} - V' i'}{Vi}.$$

Les quantités sur lesquelles on peut commettre des erreurs sont r_a, r_d, V', i' et N. Les expressions des erreurs partielles sont les suivantes :

$$\frac{d\eta}{dr_a} dr_a = -\frac{\left(i - \frac{V}{r_d}\right)^2}{Vi} dr_a = \left(-\frac{i}{V} + 2\frac{1}{r_d} - \frac{V}{i}\frac{1}{r_d^2}\right) dr_a,$$

$$\frac{d\eta}{dr_d} dr_d = -\frac{2r_a dr_d}{r_d^2} + 2r_a \frac{V}{i}\frac{dr_d}{r_d^3} + \frac{V}{i}\frac{dr_d}{r_d^2}$$

$$= \left(-2r_a + \frac{2r_a}{r_d}\frac{V}{i} + \frac{V}{i}\right)\frac{dr_d}{r_d^2},$$

$$\frac{d\eta}{di'} di' = -\frac{V'}{Vi} di',$$

$$\frac{d\eta}{dV'} dV' = -\frac{i'}{Vi} dV',$$

$$\frac{d\eta}{dN} dN = -\frac{1}{Vi}\frac{d}{dN}\left(V' i'\right) dN.$$

Comme l'on a admis qu'entre les limites d'expérience les pertes représentées par $V' i'$ sont proportionnelles à la vitesse, la dernière différentielle est égale à l'expression

$$-\frac{V' i'}{Vi}\frac{dN}{N}.$$

Application : $V = 114$ volts,
$i = 75$ ampères,
$N = 900$ tours par minute,
$r_a = 0{,}061$ ohm,
$r_d = 32{,}95$ ohms,
$V' = 109$ volts,
$i' = 4{,}89$ ampères.

$$\frac{d\eta}{dr_a}\,dr_a = -\,0{,}5987\ dr_a,$$

$$\frac{d\eta}{dr_d}\,dr_d = 0{,}00129\ dr_d,$$

$$\frac{d\eta}{di''}\,di'' = -\,0{,}01276\ di'',$$

$$\frac{d\eta}{dV'}\,dV' = -\,0{,}0005723\ dV',$$

$$\frac{d\eta}{dN}\,dN = -\,0{,}0624\ \frac{dN}{N}.$$

Supposons qu'on veuille que l'erreur probable E_p du résultat soit 0,005 η.

$$E_p^2 = e_{r_a}^2 + e_{r_d}^2 + e_{i''}^2 + e_{V'}^2 + e_N^2.$$

Si l'on admet que toutes les erreurs doivent avoir la même importance

$$e = \frac{E_p}{\sqrt{5}} = \frac{0{,}005}{\sqrt{5}}\,\eta;$$

or

$$\eta = 0{,}855,$$

d'où

$$e = 0{,}001911.$$

Si l'on égale $\frac{d\eta}{dr_a}dr_a$, $\frac{d\eta}{dr_d}dr_d$, $\frac{d\eta}{di''}di''$, $\frac{d\eta}{dV'}dV'$, $\frac{d\eta}{dN}dN$ à cette valeur, on trouve

$$\frac{dr_a}{r_a} = 0{,}0523,$$

$$\frac{dr_d}{r_d} = 0{,}0450,$$

$$\frac{di''}{i''} = 0{,}0307,$$

$$\frac{dV'}{V'} = 0{,}0307,$$

$$\frac{dN}{N} = 0{,}0307.$$

On constate, par ce qui précède, qu'il n'est pas nécessaire de mesurer les résistances de la dynamo exactement à la température

de régime. Les erreurs permises, de 5 et 4,5 pour 100, autorisent un écart de température de plus de 10° C, le coefficient de variation du cuivre étant 0,004. Dans ce cas, comme dans beaucoup de cas analogues, l'erreur la plus forte est une erreur systématique, provenant de ce qu'on admet dans la méthode que les pertes dans le fer et les pertes par courants de Foucault dans le cuivre de la machine sont les mêmes à vide et en pleine charge.

Méthode de M. Routin. — Les pertes par effet Joule dans l'induit et dans l'inducteur ayant été déterminées par le calcul, les pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault peuvent s'estimer par des observations purement mécaniques, en admettant, comme dans la méthode précédente, que ces pertes sont les mêmes en charge et à vide.

Pour obtenir les pertes par frottements, on lance l'induit à une vitesse supérieure à la vitesse normale, puis on le laisse revenir au repos, après avoir désexcité les inducteurs et en observant les vitesses décroissantes. Celles-ci se relèvent, soit avec un tachymètre dont le coefficient de frottement est négligeable, soit avec un compteur dont on lit l'indication toutes les minutes, soit, enfin, en notant la force électromotrice induite sous l'influence du magnétisme rémanent.

On dresse une courbe dont les temps figurent les abscisses et les vitesses angulaires les ordonnées.

Si I est le moment d'inertie de l'induit, ω la vitesse angulaire à un moment donné, la force vive à cet instant est

$$W = \frac{1}{2} I \omega^2.$$

Lorsque l'induit continue à tourner sans fournir ni recevoir d'énergie extérieure, les frottements absorbent une puissance

$$P = -\frac{dW}{dt} = -I\omega\frac{d\omega}{dt}.$$

La valeur $\frac{d\omega}{dt}$ à un moment quelconque est donnée par la tangente à la courbe $\omega = f(t)$.

Comme le moment d'inertie I est inconnu, on élimine cette quantité en répétant l'expérience, après avoir appliqué sur la poulie de la machine un frein à corde développant un couple résistant supplémentaire.

Si, pour une même vitesse ω, on relève la valeur $\frac{d\omega}{dt} = \text{tang}\,\alpha$ sur la première courbe et la valeur $\frac{d\omega}{dt} = \text{tang}\,\alpha_1$ sur la seconde, on a, en appelant P_1 la puissance absorbée par le frein,

$$P = -\,I\,\omega\,\text{tang}\,\alpha,$$
$$P + P_1 = -\,I\,\omega\,\text{tang}\,\alpha_1,$$

d'où

$$P = P_1\,\frac{\text{tang}\,\alpha}{\text{tang}\,\alpha_1 - \text{tang}\,\alpha}.$$

On règle P_1 de telle manière que l'on ait approximativement $\text{tang}\,\alpha = \frac{1}{2}\,\text{tang}\,\alpha_1$. En pratique, le frein à corde doit absorber environ 5 pour 100 de la puissance totale de la dynamo.

Si l'on fait les essais en excitant la machine de manière qu'elle produise à vide la force électromotrice normale avec la vitesse normale et que, partant, le flux à travers l'induit ait la valeur de régime, on obtient une valeur de la puissance comprenant les pertes par hystérésis, courants de Foucault et frottements, sous réserve des restrictions faites, dans la méthode de M. Swinburne, au sujet des erreurs provenant des distorsions de flux et de l'accroissement des frottements en charge.

La courbe $\omega = f(t)$ est sensiblement rectiligne aux environs de la vitesse normale; elle se confond donc avec la tangente, ce qui permet d'obtenir la direction de celle-ci avec beaucoup d'exactitude.

Si l'on cherche simplement le rendement

$$\eta = \frac{v\,i}{vi + r_a\,i_a^2 + r_i\,i_i^2 + a},$$

la valeur de a est donnée par deux séries d'expériences. Mais, vu la facilité de l'essai, il est intéressant de répéter les mesures pour estimer les frottements seuls. On peut même déterminer le frottement des balais, en ajoutant une expérience avec les frotteurs relevés.

La méthode de M. Routin a, comme celle de M. Swinburne, l'avantage de permettre l'essai de dynamos puissantes avec une source d'énergie relativement faible. Cette source auxiliaire peut être électrique ou mécanique.

Séparation des pertes par frottements, par courants de Foucault et par hystérésis dans l'induit. — Il est très utile

de déterminer séparément les pertes par courants de Foucault et par hystérésis qui amènent l'échauffement du noyau en fer d'un induit.

L'effet des courants de Foucault est sensiblement proportionnel au carré de la vitesse, car il est proportionnel au carré de la force électromotrice d'induction qui leur donne naissance et inversement proportionnel à la résistance, laquelle ne varie pas beaucoup si l'échauffement de l'induit n'est pas exagéré.

L'échauffement par hystérésis est, pour une induction magnétique maxima donnée, proportionnel à la vitesse et indépendant du sectionnement du noyau, pourvu que le volume total du fer de ce dernier reste constant. Les pertes par frottements sont aussi sensiblement proportionnelles à la vitesse.

S'appuyant sur ces considérations, M. Mordey a combiné une méthode industrielle propre à déterminer séparément l'effet de ces deux catégories de phénomènes. Il commence par mesurer la puissance absorbée par les frottements de la machine tournant à vide, à des vitesses différentes. Il obtient ainsi, à l'aide du dynamomètre de transmission, des valeurs croissant proportionnellement à la vitesse. Il détermine ensuite la puissance absorbée lorsque la dynamo marche à des vitesses croissantes, les inducteurs étant excités séparément de manière à produire le flux normal à travers l'induit et les balais étant enlevés.

Les puissances observées dans ces conditions correspondent aux frottements, aux courants de Foucault et aux effets d'hystérésis. Par différence, on obtient les puissances absorbées, à diverses vitesses, par ces deux dernières causes. Soient P et P′ ces puissances à des vitesses N et N′. L'expression de la puissance dissipée par les courants parasites peut être mise sous la forme kN^2 et celle correspondant aux effets magnétiques sous la forme $k'N$.

On a donc

$$P = k\,N^2 + k'\,N,$$
$$P' = k\,N'^2 + k'\,N',$$

d'où

$$k = \frac{P'\,N - P\,N'}{N'^2\,N - N'\,N^2},$$

$$k' = \frac{P'\,N^2 - P\,N'^2}{N'\,N^2 - N\,N'^2}.$$

Ces deux coefficients mesurent la perte d'énergie par tour due respectivement aux courants de Foucault et au phénomène d'hystérésis.

Les courants parasites qui interviennent dans la méthode exposée sont ceux du noyau en fer, des pièces de consolidation et des conducteurs induits enroulés sur le noyau. Pour estimer séparément l'influence des deux premières causes, on pourrait faire tourner d'abord le noyau seul entre les inducteurs excités. On garnirait ensuite l'induit de ses bobines et l'on renouvellerait l'expérience. Par différence, on connaîtrait la perte due aux courants de Foucault dans l'enroulement.

Il est à remarquer que la méthode de M. Routin peut conduire également à la séparation des pertes par frottements, hystérésis et courants de Foucault, car il suffit de calculer, d'après les courbes tracées, les pertes à diverses vitesses et d'appliquer les équations précédentes pour définir les diverses causes de déchet.

M. Housman a étudié une méthode propre à conduire au même résultat que le procédé de M. Mordey, mais en évitant l'emploi, toujours peu exact, du dynamomètre. Les inducteurs de la dynamo sont excités séparément de manière à créer le flux magnétique normal à travers l'induit et l'on fait tourner celui-ci, comme moteur à vide, à des vitesses différentes N, N', N''..., en faisant varier la différence de potentiel appliquée aux balais. En appelant e et i les valeurs de la différence de potentiel et du courant dans l'induit observées dans l'une des expériences faite à la vitesse N, et en remarquant qu'on a sensiblement $e = a\,\mathrm{N}$, a étant un facteur de proportionnalité qu'on peut déterminer en mesurant N, il vient

$$ei = a\,\mathrm{N}\,i = k\,\mathrm{N}^2 + k'\,\mathrm{N},$$

k représentant le coefficient de perte relatif aux courants parasites et k' le coefficient correspondant aux frottements et à l'hystérésis. On déduit de là

$$i = \frac{k\mathrm{N}}{a} + \frac{k'}{a} = \frac{k\,e}{a^2} + \frac{k'}{a}.$$

Cette relation montre que l'intensité du courant est une fonction linéaire de la différence de potentiel. Deux expériences suffiraient pour tracer cette droite, mais, pour plus d'exactitude, il est bon de

relever un grand nombre de points et de marquer la direction moyenne (fig. 211). L'ordonnée à l'origine $\frac{k'}{a}$ mesure le courant i_0 nécessaire pour faire démarrer l'induit.

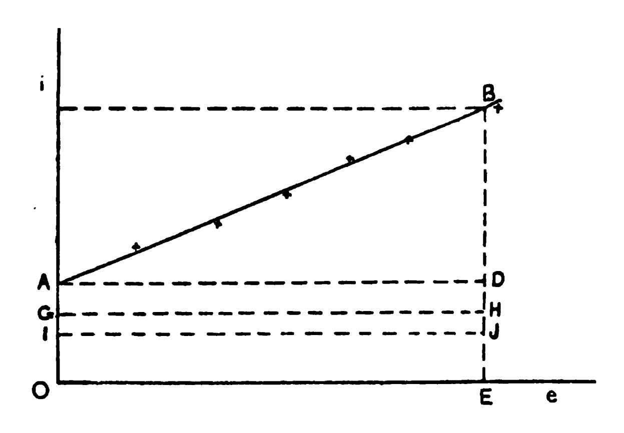


Fig. 211.

A la vitesse N pour laquelle $e = \text{O E}$, les pertes $\frac{k'e}{a}$ proportionnelles à la vitesse sont représentées par l'aire ADEO.

Comme tang BAD $= \frac{k}{a^2}$, les pertes par courants de Foucault $\frac{ke^2}{a^2}$ peuvent être représentées par la surface ADBC $= e^2$ tang BAD.

Si l'on veut déterminer les pertes IJEO par frottements contre l'air et dans les coussinets, on actionne à l'aide du moteur étudié une autre machine identique tournant sans excitation et avec les balais relevés. Le supplément de puissance nécessaire à la première dynamo donne la mesure des pertes susdites. Pour connaître les pertes occasionnées par les frottements des balais, on n'a qu'à déterminer la puissance électrique GHJI absorbée en plus quand les balais de la seconde machine sont abaissés. Les frottements des balais ne sont nullement négligeables: dans les petites machines, ils acquièrent parfois une grande importance; dans les grandes dynamos multipolaires à balais multiples et à collecteurs de grand diamètre, il est bon de vérifier également si les frottements des balais n'absorbent pas une puissance exagérée.

M. Hummel a indiqué un moyen simple pour séparer les pertes

par frottements d'un moteur. On réduit simultanément l'excitation et le voltage aux bornes, de manière à maintenir invariable la vitesse de la machine tournant à vide. Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault décroissent progressivement, mais les frottements restent sensiblement constants. Si l'on porte en ordonnées les puissances en watts absorbées par l'induit et en abscisses les tensions appliquées à celui-ci, on obtient une courbe qui tend visiblement vers une asymptote parallèle à l'axe des tensions. L'ordonnée de cette asymptote, qu'il est aisé de tracer, représente les pertes par frottements.

Chapitre XXXIII.

ALTERNATEURS ET ALTERNOMOTEURS.

Courbes de force électromotrice des alternateurs. Procédés de M. Joubert, de M. Blondel, de MM. Abraham-Carpentier, de M. Duddell et de l'auteur. — Les observations faites au sujet des mesures à exécuter avant et pendant la construction des dynamos à courant continu subsistent pour les alternateurs. A ces mesures s'ajoute, à l'occasion de l'étude d'un nouveau type de machine, le tracé de la courbe de force électromotrice.

1. Un moyen permettant de calculer la force électromotrice à circuit ouvert consiste à déterminer, par l'un des procédés décrits précédemment, la distribution du champ magnétique dans lequel se meut l'armature et à déduire de là, en appliquant la loi générale de l'induction, la courbe qui représente en fonction du temps la force électromotrice d'un circuit se déplaçant dans ce champ avec une vitesse angulaire uniforme. Cette méthode n'est d'une application commode que dans le cas d'un induit à disque sans fer ou d'un induit à noyau uni, car, si le noyau est pourvu d'une denture, la distribution des lignes de force varie avec la position de l'armature et il convient de déterminer cette distribution pour un grand nombre de positions successives.

On conçoit qu'en modifiant la forme des pièces polaires d'un alternateur on puisse, dans une certaine mesure, changer le taux de variation du flux qui traverse les bobines induites en mouvement, et, par suite, modifier la forme de la courbe figurant la force électromotrice. Les ondes de cette courbe présentent des crêtes aplaties ou élancées suivant que les pièces polaires couvrent une surface plus ou moins grande de l'armature.

2. Le procédé suivant, dû à M. Joubert, permet de trouver expérimentalement les points successifs de la courbe qui représente les variations de la force électromotrice en fonction du temps. Pour obtenir le point correspondant à une position déterminée de l'induit, un condensateur est disposé de manière à être relié à ce dernier à l'instant considéré. Dans ce but, l'une des extrémités du circuit mobile communique avec l'une des armatures du condensateur par l'intermédiaire d'une bague fixée sur l'arbre et d'un ressort frotteur. L'autre extrémité du circuit est attachée à une lame de cuivre étroite, incrustée dans une bague isolante, et disposée sur l'axe de rotation parallèlement à celui-ci. Un second ressort, relié à l'armature libre du condensateur et appuyant sur la bague, touche un instant la lame à chaque révolution de l'armature. Si l'on fixe le ressort à un levier qu'on peut déplacer autour de l'axe de rotation et dont les positions sont repérées sur un arc de cercle, les contacts successifs avec la lame tournante chargent le condensateur à une différence de potentiel précisément égale à la force électromotrice que développe l'induit dans la position définie par le calage du levier. On détermine cette différence de potentiel à l'aide d'un galvanomètre balistique ou avec un électromètre. En répétant l'expérience pour une série de positions du levier séparées par des écarts angulaires correspondant à des fractions de la période, on arrive à relever les points de la courbe considérée.

On peut aussi apprécier la différence de potentiel instantanée par la méthode d'opposition. On relie les bornes entre lesquelles la différence de potentiel se produit, par l'intermédiaire d'un galvanomètre et du contact tournant, à un rhéostat parcouru par un courant continu. On règle la résistance comprise entre les points de raccordement au rhéostat jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. Si la résistance variable est un fil divisé comme

dans les potentiomètres, en appelant L la longueur totale du fil, V la différence de potentiel de ses extrémités, l la longueur de fil qui ramène le galvanomètre au zéro, on a simplement pour la tension cherchée.

$$v = V \frac{l}{L}.$$

Il arrive parfois, dans la méthode de M. Joubert, que des charges électriques statiques, développées par le frottement de la courroie sur la poulie de la machine, donnent au condensateur une charge parasite qui peut fausser les résultats. Il faut avoir soin de relier l'arbre de l'alternateur à la terre pour éviter cette perturbation.

Les méthodes considérées peuvent être employées pour déterminer non seulement la force électromotrice d'un alternateur à circuit ouvert, mais aussi la différence de potentiel développée par le générateur aux bornes d'un circuit extérieur ou aux extrémités d'une résistance quelconque intercalée dans ce circuit. On peut constater ainsi que la courbe de la différence de potentiel aux bornes d'un alternateur est modifiée lorsqu'on introduit dans le circuit des électro-aimants, dont l'aimantation n'est pas proportionnelle à l'intensité du courant.

Ces procédés peuvent être appliqués, pour trouver les variations d'une différence de potentiel périodique quand l'alternateur qui engendre celle-ci n'est pas accessible, en se servant d'un petit moteur synchrone pour faire tourner le contact mobile.

3. D'autres méthodes reposent sur l'enregistrement direct du courant fourni par l'alternateur.

Nous avons vu, au chap. VI, que l'équation du mouvement d'un galvanomètre est de la forme

$$A \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + B \frac{d\alpha}{dt} + C \alpha = D i.$$

Le premier terme représente le couple dû à l'inertie, le deuxième le couple amortisseur, le troisième le couple directeur et le second membre contient le couple moteur.

S'il faut que le galvanomètre donne à chaque instant une déviation proportionnelle au courant, l'équation doit se réduire à

$$C \alpha = D i,$$

c'est à dire que les couples d'inertie et d'amortissement doivent être négligeables devant le couple directeur. Il faut donc que la période d'oscillation du galvanomètre soit beaucoup plus courte que celle du courant et que l'amortissement, tout en étant faible, soit suffisant pour masquer les oscillations propres du galvanomètre.

Naturellement, la réactance, l'hystérésis et les courants de Foucault du galvanomètre doivent être assez faibles pour ne pas apporter de perturbations dans le courant étudié.

Le procédé ci-après, employé par l'auteur, permet d'enregistrer la courbe d'un alternateur tournant d'un mouvement très lent entretenu par un moteur électrique qui agit par l'intermédiaire d'un mécanisme retardateur (1). L'induit de l'alternateur est relié à un galvanomètre du genre des appareils Deprez et d'Arsonval, dont le champ est produit par un électro-aimant puissant. Les pièces polaires de celui-ci sont constituées par deux plaques de fer parallèles et rapprochées, entre lesquelles oscille une petite bobine galvanométrique très légère portant un miroir. La suspension métallique de cette bobine est réglée de manière que la période d'oscillation du système mobile en circuit ouvert ne dépasse pas la vingtième partie de la période de la force électromotrice étudiée. Dans ces conditions, les élongations ne sont pas sensiblement modifiées par la période d'oscillation propre de l'appareil. Un shunt rend le galvanomètre apériodique. Les déviations du miroir, qui peuvent être inscrites par le procédé photographique de l'auteur, décrit au chap. II, fournissent directement la courbe cherchée.

4. M. Duddell a modifié l'oscillographe précédent en vue d'enregistrer les courants alternatifs de fréquence normale. Dans ce but, il a remplacé la bobine Deprez et d'Arsonval par deux bandes métalliques tendues dans l'entrefer d'un électro-aimant et traversées en sens inverses par le courant, de manière à être soumises à des efforts déviants contraires. Un miroir fixé aux bandes de métal accuse le couple développé. Bandes et miroir sont noyés dans l'huile de ricin, qui produit un

(1) *Bull. de l'Académie de Belgique*, 1888.

amortissement énergique. Un miroir tournant est utilisé pour l'enregistrement des déviations (chap. II). M. Blondel a perfectionné ce système, en étudiant la meilleure disposition à donner aux fils tendus et en appliquant la lentille cylindrique de M. Boys pour l'enregistrement. La période propre de l'instrument a pu être réduite à 1/12000 de seconde.

5. M. Blondel (1) a réalisé également un oscillographe permettant d'enregistrer les courants alternatifs de courte période, à l'aide d'un dispositif qui rappelle le galvanomètre Deprez à

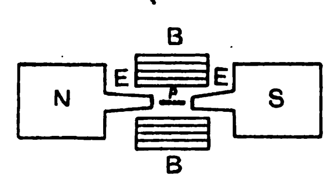


Fig. 212.

palette mobile. Une palette de fer mince *p*, de 0,2 mm d'épaisseur, 1 mm de largeur et 15 mm de hauteur, porte un miroir de 15 mm^2 et est fixée, sur pointes, entre les épanouissements polaires E E, en forme de lames, d'un fort électro-aimant N S. Les bobines B B parcourues par les courants à enregistrer font dévier la palette. Grâce à l'intensité du champ directeur, la période de vibration de la pièce mobile est réduite à $^1/_{45000}$ de seconde. La palette est logée dans une boîte fermée par une lentille qui renforce l'éclat de l'image. La cavité est remplie d'huile de ricin qui assure l'amortissement.

Pour la lecture directe ou l'enregistrement photographique des oscillations de la palette, M. Blondel a recours au disque fendu décrit au chap. II.

6. M. Abraham (2) a fait remarquer que, si le couple amortisseur

(1) *Comptes-rendus*, 6 mars et 10 avril 1893.

(2) *Bulletin de la Soc. Int. des Électr.*, 1897.

et le couple directeur étaient négligeables devant le couple d'inertie, l'équation du mouvement deviendrait

$$A\frac{d^2\alpha}{dt^2} = Di$$

et l'on pourrait obtenir la proportionnalité entre le courant et les déviations en faisant passer dans le galvanomètre, non le courant i, mais un courant I, dû à deux inductions successives, qui, avec des circuits de self-induction négligeable, serait proportionnel à $\frac{d^2 i}{dt^2}$. On aurait alors

$$A\frac{d^2\alpha}{dt^2} = DI = D'\frac{d^2 i}{dt^2};$$

d'où

$$\alpha = \frac{D'}{A}i.$$

Comme il est difficile de rendre le couple amortisseur et le couple directeur négligeables, M. Abraham, en collaboration avec M. Carpentier, a étudié un oscillographe dans lequel le circuit est traversé :

1° par le courant induit de second ordre signalé ci-dessus, qui correspond au couple d'inertie ;

2° par une fraction du courant induit de premier ordre, qui donne un terme en $\frac{di}{dt}$ correspondant au couple amortisseur ;

3° par une dérivation du courant principal, pour tenir compte du couple directeur.

Dans ces conditions, la déviation est rigoureusement proportionnelle au courant.

7. L'auteur a suggéré le dispositif suivant. Une bande d'acier circulaire tourne grâce à un moteur synchrone parcouru par le courant à enregistrer, pendant qu'un électro-aimant dont les pôles embrassent la bande est traversé par le même courant. L'acier prend des polarités transversales en rapport avec les valeurs momentanées de l'intensité du flux électrique.

On a soin de limiter les forces magnétisantes de manière à obtenir sensiblement la proportionnalité entre l'aimantation et le courant. On peut d'ailleurs, avec un courant connu convenablement choisi,

donner une aimantation initiale qui sert de contrôle et qui est alternativement accrue et diminuée par le courant étudié. On fait ensuite repasser la bande, aussi lentement que possible, devant une aiguille aimantée amortie. Les déviations de l'équipage mobile permettent de déterminer l'intensité du courant excitateur à chaque instant d'une période.

Mesure de la fréquence d'un alternateur. — Pour déterminer la fréquence d'un alternateur, on peut se servir des oscillographes décrits précédemment.

Un moyen plus simple consiste à enregistrer, sur un cylindre animé d'un mouvement de vitesse connue, l'étincelle produite dans le circuit secondaire d'une bobine d'induction dont le circuit primaire est parcouru par tout ou partie du courant de l'alternateur. L'échelle des temps peut être graduée par le procédé décrit à la page 43.

MM. Moller et Bedell ont imaginé de faire passer le courant dans un fil métallique tendu entre les pôles d'un aimant puissant, en déplaçant sur le fil un cavalier qui en limite la longueur. Lorsque la période du courant correspond à celle du fil, celui-ci prend un mouvement vibratoire bien accusé.

MM. Kempf et Hartmann sont arrivés à un fréquencemètre à lecture directe par le procédé suivant. Un électro-aimant, parcouru par le courant étudié, pivote autour d'un axe de manière à présenter ses pôles successivement devant une série d'anches d'acier accordées sur des périodes croissantes. On arrête l'électro-aimant devant la lame qui rend le son le plus net et on lit sur une graduation la fréquence correspondant à ce son.

Mesure du rendement industriel d'un alternateur. Procédé électromécanique direct. — La mesure du rendement d'un alternateur, c'est à dire la détermination du rapport entre la puissance électrique aux bornes de l'induit et la puissance mécanique absorbée par l'arbre de la machine, s'effectue en évaluant cette dernière par l'un des procédés décrits au chap. II, tandis que la puissance électrique utile est relevée par l'une des méthodes applicables aux courants alternatifs. A moins de convention contraire, la puissance utile est estimée dans des conditions telles que le courant est en phase avec la tension.

Dans l'estimation de la puissance absorbée par un alternateur on tient compte de la dépense par effet Joule dans l'excitation. Si l'on cherche le rendement de l'ensemble de l'alternateur et de l'excitatrice, il faut considérer les pertes de cette dernière.

Pour recueillir les éléments nécessaires au tracé de la courbe du rendement et de la caractéristique extérieure sous diverses charges, il faut répéter les expériences en maintenant invariables la vitesse de l'alternateur et son excitation et en faisant varier la résistance reliée à ses bornes. Si l'on veut construire les courbes de réaction d'induit, on maintient au contraire le courant de l'induit constant, ainsi que la vitesse, et l'on donne au courant d'excitation des intensités variables. En faisant les essais avec divers régimes du courant dans l'induit, on réunit les données permettant de déterminer la réaction d'induit correspondant à une excitation et à un courant utile quelconques.

La méthode directe de mesure du rendement nécessite souvent des moteurs très puissants, dont les laboratoires ne disposent que rarement. En outre, elle comporte une cause d'erreur importante due à l'incertitude du rendement organique de la machine motrice. Pour ces raisons, on a cherché des méthodes supprimant les mesures mécaniques ou restreignant considérablement la portée des erreurs que celles-ci entraînent, tout en permettant l'emploi de moteurs dont la puissance est beaucoup plus faible que celle des alternateurs essayés. Comme pour les dynamos à courant continu, l'essai direct est toutefois le seul qui renseigne sur les qualités mécaniques des paliers, sur les frottements que ceux-ci éprouvent sous l'effet des courroies et sur la valeur réelle des pertes électromagnétiques en charge.

Méthode indirecte de mesure du rendement. — Le rendement étant le rapport entre la puissance utile et cette même puissance additionnée des pertes intérieures, il est possible de l'obtenir en déterminant séparément les diverses pertes.

Les pertes par effet Joule dans l'inducteur et dans l'induit se calculent après avoir déterminé les résistances à chaud et les courants normaux. Les pertes par hystérésis, par courants de Foucault et par frottements s'évaluent approximativement en entraînant l'alter-

nateur par un moteur électrique de rendement connu, l'excitation étant réglée de manière à obtenir le flux normal à travers l'induit. Pour cela, l'alternateur tournant à circuit ouvert, à la vitesse de régime, doit donner aux bornes la différence de potentiel de service augmentée de la perte ohmique de pleine charge dans l'armature.

L'excitatrice de l'alternateur est souvent employée comme moteur à courant continu dans cet essai. On peut aussi mesurer les pertes en faisant fonctionner l'alternateur comme moteur synchrone à vide, en ajustant l'excitation de manière à avoir le courant minimum dans l'induit et en mesurant au wattmètre la puissance fournie, mais cette méthode est susceptible de donner des erreurs plus fortes que la précédente.

Il faut remarquer que les pertes évaluées en faisant fonctionner la génératrice à vide ne correspondent pas exactement aux pertes en charge, car, dans ces dernières conditions, les distorsions de flux peuvent aggraver les déchets par courants de Foucault et par hystérésis, en même temps que les frottements sont accrus. On a trouvé pour diverses machines environ 10 pour 100 de supplément de perte en charge.

La méthode de M. Routin, décrite à propos des machines à courant continu, convient également pour la détermination des pertes intérieures des alternateurs à vide.

Pour évaluer le supplément de perte en charge, on a proposé le procédé empirique suivant. On fait fonctionner l'alternateur en court-circuit sur un ampèremètre en l'excitant de manière à obtenir le courant normal. Le tiers de la puissance absorbée par l'alternateur dans ces conditions est considéré comme représentant la perte additionnelle due à la charge.

Autres méthodes. — Lorsqu'on dispose de deux alternateurs identiques on peut adopter des méthodes analogues à celles de MM. Hopkinson, Fontaine et Cardew pour les machines à courants continus.

L'un des alternateurs peut fonctionner comme moteur pour entraîner l'autre appareil servant de génératrice. On règle la marche de manière que la moyenne des puissances des deux machines corresponde à la puissance normale. Dans ce cas, le rendement est sensiblement égal à la racine carrée du rapport de la puissance débitée par la génératrice à la puissance absorbée par le moteur.

Si l'on relie les circuits des deux induits de manière que la génératrice envoie un courant dans le moteur, il suffit de fournir au système la puissance correspondant aux pertes intérieures des deux machines.

Méthode de M. Behn-Eschenburg pour prédéterminer la chute de tension d'un alternateur. — M. Behn-Eschenburg a indiqué comment, à l'aide de quelques expériences préalables effectuées sur un alternateur, il est possible de calculer la chute de tension dans l'induit de cette machine pour toutes les impédances extérieures, dans l'hypothèse de variations sinusoïdales.

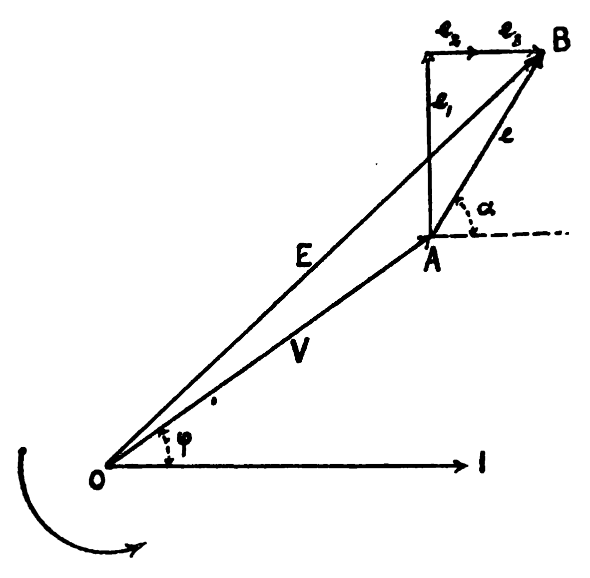


Fig. 213.

Représentons par OA la différence de potentiel efficace V aux bornes et par OI le courant efficace produit par l'alternateur dans un état de régime. La réactance, supposée positive, du circuit extérieur détermine un retard φ du courant sur la différence de potentiel.

Pour remonter de cette dernière à la force électromotrice totale de l'alternateur, il faut faire entrer en ligne de compte les pertes de tension dues : 1° à la self-induction de l'induit, 2° à sa résistance R et 3° à la réaction des courants de Foucault que le courant induit occasionne dans les masses métalliques avoisinant l'armature.

La force électromotrice de self-induction est figurée par un vecteur e_1 normal à celui du courant ; elle n'occasionne aucune perte d'énergie, car le produit moyen de deux vecteurs normaux est nul. La chute de tension due à la résistance ohmique de l'induit est représentée par un vecteur e_2 parallèle à OI et égal à IR. Enfin, la perte en volts due aux courants de Foucault peut être figurée dans le prolongement de e_2 par e_3 ; elle a une valeur très minime dans les machines bien construites.

La résultante OB des vecteurs V, e_1, e_2 et e_3 est la force électromotrice efficace totale E de l'alternateur.

La résultante des trois vecteurs e_1, e_2 et e_3 est AB. Le rapport de cette grandeur à l'intensité efficace du courant peut s'appeler la résistance apparente de l'induit :

$$R_{app} = \frac{e}{I}.$$

La connaissance de cette résistance apparente pour les divers régimes de l'alternateur résulte des expériences suivantes.

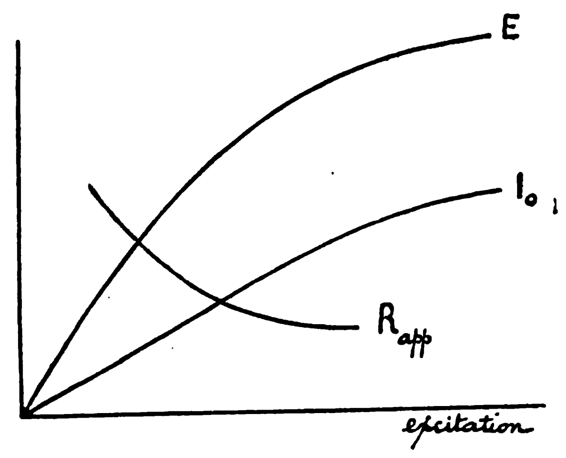


Fig. 214.

L'induit tournant à sa vitesse normale, on dresse la courbe E, fig. 214, des forces électromotrices à circuit ouvert correspondant à diverses valeurs données aux ampères-tours d'excitation.

Une seconde courbe I_o a pour ordonnées les courants lus sur un ampèremètre mettant la machine en court-circuit pendant qu'on

fait repasser les inducteurs de la machine par les mêmes états d'aimantation que ci-dessus. Cette ligne est sensiblement droite ; elle présente une courbure très légère dans la région correspondant aux champs intenses. Comme les intensités ainsi relevées peuvent dépasser le double de l'intensité normale du courant induit, les essais doivent être faits rapidement pour ne pas détériorer l'alternateur, dont la vitesse peut d'ailleurs varier dans cette seconde série d'expériences. La puissance nécessaire pour faire tourner l'alternateur en court-circuit peut être empruntée à un moteur développant 10 à 15 pour 100 de la puissance normale de l'alternateur. L'excitatrice même de l'alternateur est souvent employée à cet effet.

Les deux courbes E et I_0 conduisent à la courbe R_{app}, dont les ordonnées sont égales aux rapports des ordonnées E et I_0 correspondantes.

De ces données résulte la chute de tension totale dans l'induit, lorsque celui-ci produit un courant efficace I dans un circuit quelconque, avec une excitation déterminée.

On relève, sur la fig. 214, la valeur de R_{app} correspondant à l'excitation considérée et l'on a

$$e = R_{app}\, I.$$

Dans les bonnes machines, les pertes dues à la résistance ohmique et aux courants de Foucault sont faibles par rapport à e_1 et l'on ne commet pas une grande erreur en supposant que, dans la fig. 213, α est voisin de $\frac{\pi}{2}$, soit 85° par exemple.

Dans cette hypothèse, il est facile de prédéterminer le voltage V aux bornes d'un alternateur, connaissant l'excitation de celui-ci et le courant I à débiter dans un circuit extérieur dont le facteur de puissance est cos φ.

Des courbes de la fig. 214 on déduit les valeurs de E et e, et l'on applique la relation ci-après existant entre les côtés du triangle OAB de la fig. 213 :

$$E^2 = V^2 + e^2 + 2Ve \cos(\alpha - \varphi).$$

Rendement des commutatrices. — La puissance du côté alternatif est mesurée lorsqu'il y a coïncidence de phase entre la tension et le courant.

Quand la commutatrice est employée comme générateur polymorphique, pour produire à la fois du courant continu et du courant alternatif, le rendement se détermine comme celui d'une machine à courant continu ou d'un alternateur, en ayant égard aux différences qui peuvent exister dans les deux cas.

Les pertes intérieures par frottements, hystérésis et courants de Foucault peuvent être déterminées dans ces appareils en les entraînant par un moteur et en tenant compte des observations faites précédemment en ce qui concerne la vitesse et la tension.

La perte par effet Joule dans l'enroulement induit est de la forme Kri^2, i étant le courant continu fourni par l'induit, r la résistance de celui-ci prise du côté du collecteur divisé et K un facteur égal à 1,37 avec les courants alternatifs simples, 0,56 avec les courants triphasés, 0,37 avec les courants tétraphasés et 0,26 avec les courants hexaphasés.

La perte par effet Joule dans l'inducteur se détermine de la façon ordinaire.

Si l'on doit mesurer le rendement de deux machines identiques, on peut faire fonctionner l'une comme convertisseur de courant continu en courant alternatif et l'autre comme convertisseur de courant alternatif en courant continu, en connectant les machines entre elles par leurs circuits à courants alternatifs et en mesurant la puissance continue fournie à la première machine et celle débitée par la seconde.

Rendement des moteurs asynchrones polyphasés. — La seule méthode rigoureuse pour évaluer le rendement d'un moteur asynchrone consiste à déterminer par des wattmètres la puissance fournie, tandis que la puissance mécanique développée est mesurée au frein ou en entraînant une génératrice de rendement connu. Il convient, dans ce genre d'essais, de déterminer le *glissement* ainsi que le facteur de puissance qui jouent un rôle important dans les applications.

Voici, à titre d'exemple, les résultats donnés par un moteur triphasé de 11 chevaux effectifs, 240 volts étant appliqués aux extrémités de l'étoile formée par les enroulements inducteurs. Vitesse normale : 800 tours par minute.

Dans un premier essai, l'on a mesuré la puissance électrique absorbée par le moteur marchant à vide à la vitesse de régime.

Le wattmètre, employé par la méthode décrite au chap. XV, page 278, a fourni les lectures suivantes :

1re LECTURE	2e LECTURE
11,8	— 1,2
11,4	— 1,2

En multipliant la somme algébrique des lectures moyennes 11,6 — 1,2 par la constante de l'instrument, on obtient 733 watts.

Le moteur ayant été accouplé par une courroie à une génératrice continue, on a mesuré la puissance absorbée lorsque celle-ci était chargée de manière à faire produire au moteur triphasé sa puissance normale.

WATTMÈTRE :	1re LECTURE	2e LECTURE
	92,6	52
	92,5	52,3

La puissance correspondante est 10 200 watts.

Enfin la génératrice a été entraînée à vide avec l'excitation correspondant au flux de l'expérience précédente.

WATTMÈTRE :	1re LECTURE	2e LECTURE
	22,6	9
	22	9,4

Puissance correspondante : 2215 watts.

La puissance utile débitée par la génératrice continue était, dans le second essai, de 6 500 watts. A cette valeur, il faut ajouter, pour obtenir la puissance effective du moteur : *a)* le déchet par effet Joule dans la génératrice, qui, d'après la résistance mesurée à chaud et l'intensité du courant, représentait 67,3 watts ; *b)* les

pertes par hystérésis, courants de Foucault et frottements de la génératrice et par frottements de la courroie; une première approximation est donnée par la différence 2 215 — 733 = 1 482 watts des puissances trouvées dans les deux marches à vide. Il est vrai que cette évaluation suppose que le rendement du moteur est resté constant dans ces deux essais, ce qui est inexact. Le rendement était moindre dans l'essai sans génératrice; par suite la différence trouvée est trop petite. Par contre, les pertes de la génératrice sont plus grandes en charge qu'à vide.

En acceptant le nombre 1 482, on arrive à 6 500 + 67,3 + 1 482 = 8049,3 watts pour la puissance mécanique utile du moteur; d'où le rendement

$$\frac{8049,3}{10\,200} = 0,79.$$

En charge, le facteur de puissance ou rapport des watts aux volts-ampères était 0,815 et le glissement 0,0502.

Chapitre XXXIV.

TRANSFORMATEURS.

Objet des essais. — De même que pour les dynamos continues et les alternateurs, il convient d'essayer, avant la construction d'un transformateur, le fer et le cuivre employés. La perte par hystérésis dans le fer a une importance particulière dans ce cas.

Le transformateur construit, on vérifie l'isolement et la valeur diélectrique des circuits. L'isolement laisse parfois à désirer au début, si l'on n'a pas recuit l'appareil à l'étuve pour expulser l'humidité contenue dans le coton qui recouvre les conducteurs. On peut alors, comme on le fait souvent pour les machines dynamo-électriques, obtenir la dessication en faisant passer un courant gradué dans les bobines primaires et secondaires.

L'essai le plus important au point de vue de l'emploi des transformateurs est la mesure du rendement industriel sous diverses charges, c'est à dire du rapport des watts utiles aux watts absorbés. Cette détermination peut se faire par une méthode directe ou par des méthodes indirectes analogues à celle de Lord Rayleigh et de M. Kapp ou à celle de M. Swinburne pour les machines dynamo-électriques.

Au point de vue du constructeur, il est également intéressant

de rechercher les pertes par hystérésis et par courants de Foucault, la variation du voltage secondaire lorsque le primaire est soumis à une tension constante, la température de régime et les pertes de flux.

La chute de tension peut s'estimer très exactement en opposant les circuits secondaires de deux transformateurs dont les circuits primaires sont parcourus par les mêmes courants. En chargeant l'une des bobines induites, tandis que l'autre fonctionne à circuit ouvert, on constate facilement à l'aide d'un voltmètre la différence des deux tensions secondaires. Pour cela, on donne aux deux bobines induites une borne commune, tandis que les bornes libres sont reliées au voltmètre.

Mesure directe du rendement. — Rigoureusement, le rendement d'un transformateur dépend de la forme de la courbe périodique de la tension appliquée. On devra employer une différence de potentiel sinusoïdale, à moins de stipulation contraire. Le rendement sera mesuré avec une charge sans réactance et à la fréquence normale.

Pour la mesure directe du rendement, l'on détermine les watts utiles aux bornes secondaires et les watts dépensés aux bornes primaires. Parfois, on ne dispose pas d'un générateur capable de produire la tension primaire requise. On peut alors se servir d'un transformateur auxiliaire pour l'obtention de cette tension. Comme la résistance extérieure a une réactance négligeable, il n'y a pas de différence de phase entre la tension et le courant secondaires, et la puissance utile peut se calculer en faisant le produit de la différence de potentiel efficace par le courant efficace, mesurés simultanément à l'aide d'un des voltmètres et d'un des ampèremètres étudiés précédemment à propos de la mesure des courants alternatifs. Le wattmètre peut également être employé si la réactance des circuits de l'appareil est négligeable.

La détermination de la puissance primaire exige l'emploi d'une des méthodes propres à la mesure de la puissance dans les circuits à réactance.

On peut, par exemple, utiliser la méthode des trois voltmètres préconisée par MM. Ayrton et Sumpner. Cette méthode exige une haute tension d'essai, qu'on obtient, par exemple, à l'aide d'un transformateur auxiliaire en série avec la source ; on a vu, en effet,

que le voltage absorbé par la résistance non inductive doit être sensiblement égal à la tension appliquée aux bornes primaires. La résistance non inductive est coûteuse à établir dans l'hypothèse où la tension primaire est élevée. On peut la constituer par des séries de lampes à incandescence.

On a vu que l'erreur limite de la méthode des trois voltmètres croît très rapidement quand le cosinus de l'angle de phase diminue. L'erreur peut être très considérable de ce chef, car le facteur de puissance décroît rapidement avec la charge. Enfin, les lectures multiples qu'entraîne l'emploi de trois voltmètres rendent les expériences très difficiles, lorsqu'on ne dispose pas d'une source d'électricité convenable et, en particulier, lorsqu'on doit faire les essais en se raccordant à une distribution par courants alternatifs.

La méthode de M. Fleming donne lieu à des observations analogues. Par suite des erreurs multiples que cette méthode entraîne, il conviendrait d'employer des ampèremètres pour courants alternatifs beaucoup plus précis que ceux qu'on rencontre dans l'industrie, pour obtenir un résultat satisfaisant. Il ne faut pas oublier, en effet, que la différence entre les watts utiles fournis par un bon transformateur et les watts absorbés n'atteint que 4 à 5 pour 100 de ceux-ci, lorsque l'appareil fonctionne en pleine charge, et qu'une erreur de 1 pour 100 dans la mesure des watts dépensés amène une erreur de 20 à 25 pour 100 dans l'estimation des pertes intérieures du transformateur.

La méthode de mesure la plus satisfaisante est celle du wattmètre.

Détermination indirecte du rendement. — Pour éviter les erreurs importantes auxquelles peut donner lieu la mesure directe du rendement, on détermine le plus souvent la puissance p perdue dans le transformateur par effet Joule, courants de Foucault et hystérésis, ainsi que la puissance utile P. Le rendement est alors

$$\eta = \frac{P}{P + p}.$$

On tire de là

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{dp}{P + p}.$$

Si p est estimé à 1 pour 100 près et équivaut environ à 1/20 de P, l'erreur sur η n'atteint que 0,048 pour 100. Lorsqu'on ne demande que l'approximation de 0,01, il suffit, dans l'hypothèse précédente, de mesurer p à 21 pour 100 près.

Il résulte de nombreuses expériences que les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans le fer du noyau des transformateurs à circuit magnétique fermé sont constantes, à toutes les charges, pour le voltage primaire normal.

On mesure ces pertes à circuit secondaire ouvert, en appliquant au primaire une différence de potentiel égale au voltage normal diminué de la perte ohmique ir dans le circuit inducteur, r étant la résistance de ce circuit et i le courant primaire efficace normal.

La puissance ainsi absorbée se mesure avec un wattmètre convenablement choisi. Elle représente la perte par hystérésis et par courants de Foucault dans le noyau, augmentée de la perte par effet Joule dans le primaire. Le courant primaire peut être relevé séparément pour estimer cette perte, qui est d'ailleurs minime. Il y a lieu d'estimer l'erreur du wattmètre, qui peut être forte par suite du grand décalage entre la tension et le courant primaires.

Les pertes par effet Joule dans les deux circuits du transformateur en pleine charge se calculent d'après les courants et les résistances. On peut aussi les évaluer de la manière suivante à l'aide d'un wattmètre. On met la bobine à gros fil du transformateur en court-circuit sur un ampèremètre et l'on diminue la tension appliquée au circuit à fil fin jusqu'à ce que le courant lu à l'ampèremètre ait l'intensité normale que doit débiter le circuit secondaire.

En vertu des propriétés des transformateurs, le courant dans la bobine primaire acquiert alors également son intensité normale et la dépense dans le noyau devient négligeable. La mesure, à l'aide du wattmètre, de la puissance fournie à la bobine à fil fin fait connaître la dépense en pleine charge par effet Joule dans les deux circuits augmentée de la dépense par courants de Foucault dans ces circuits due aux dispersions de flux.

En ajoutant cette puissance à celle trouvée à circuit ouvert, on obtient les pertes totales p de la formule ci-dessus.

Méthode de Sumpner. — Si l'on ne cherche pas le rendement sous une charge non inductive, un artifice analogue à celui que nous avons déjà rencontré dans l'étude des machines dynamo-électriques permet de déterminer avec précision les pertes à pleine charge d'un type de transformateur dont on possède deux spécimens identiques. Le moyen consiste à mettre en opposition les bobines à fil fin des appareils et à affaiblir légèrement la force électromotrice dans l'une des bobines, de manière à obtenir une force électromotrice résultante capable d'entretenir le courant normal. La puissance absorbée par les circuits à gros fil mis en dérivation, représente alors les pertes totales dans les deux appareils.

Diverses combinaisons sont susceptibles de donner le résultat voulu. Le schéma ci-dessous représente les deux bobines à fil fin des transformateurs A et B, mises en opposition par deux clefs C_1 et C_2. Les bobines à gros fil sont en dérivation par rapport au circuit

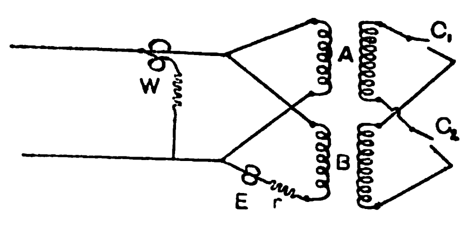


Fig. 215.

d'alimentation et l'on intercale à la suite de l'une d'elles un conducteur *r* sans réactance. On règle celui-ci jusqu'à ce qu'un électrodynamomètre E indique le courant normal. On a alors également le courant normal dans les bobines à fil fin. Un wattmètre W mesure le total des pertes dans les circuits des deux appareils alimentés. Si l'on déduit de la puissance indiquée par le wattmètre les pertes par effet Joule dans la résistance *r* et dans les fils de connexion, il reste la puissance dissipée dans les deux transformateurs. La moitié de cette quantité représente les pertes *p* dans l'un des transformateurs. La puissance transformée par chacun de ceux-ci peut être mesurée en disposant la bobine à gros fil du wattmètre en série avec les enroulements à gros fil.

Dans le dispositif de la fig. 216, la différence entre les forces électromotrices d'induction est obtenue par l'emploi d'un petit transformateur auxiliaire T dont le rapport de transformation est l'unité. Le primaire de cet appareil est dérivé sur les conducteurs d'alimentation avec une résistance R et la clef C_5. Le secondaire est en série avec la bobine à gros fil de A. Si celle-ci est construite pour une tension de 100 volts, on fait en sorte que T donne 5 à 6 volts qui, en s'ajoutant à la différence de potentiel appliquée à A ou en s'en retranchant, créent dans les circuits à fil fin de A et de B une force électromotrice résultante capable d'entretenir le courant induit normal, lorsque les clefs C_1 et C_2 sont abaissées. L'électrodynamomètre E permet de mesurer le

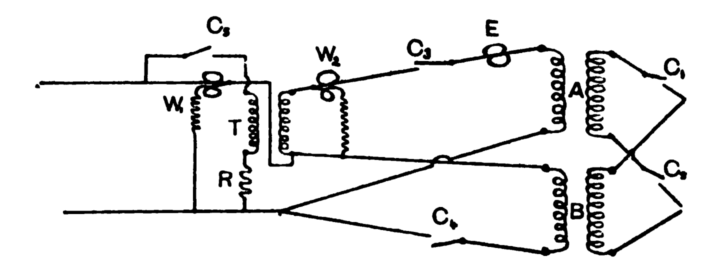


Fig. 216.

courant primaire qu'on règle par la résistance R. Si l'on abaisse les clefs C_3 et C_4 sans abaisser C_1 , C_2 et C_5 , le transformateur T est inactif, les circuits à gros fil de A et de B sont soumis à des différences de potentiel sensiblement égales et la dépense d'énergie accusée par le wattmètre W_1 représente approximativement les pertes à vide dans les transformateurs.

Si l'on abaisse toutes les clefs et si l'on règle convenablement les courants, les deux transformateurs fonctionnent en pleine charge avec les enroulements à fil fin en opposition. Le total des puissances absorbées par le système est représenté par les indications des wattmètres W_1 et W_2. En soustrayant de la somme de ces indications les pertes dans les fils de connexion, dans l'électrodynamomètre E, dans la bobine à gros fil de W_2 et dans le secondaire de T, on obtient les pertes totales dans les deux

transformateurs. p étant la moitié de ces pertes et P la puissance moyenne transformée par A et B, on a

$$\eta = \frac{P}{P + p}.$$

On pourrait introduire un électrodynamomètre dans le circuit de la bobine à gros fil de B, mais la différence entre les courants des deux enroulements à gros fil est si faible qu'elle n'apporte pas d'erreur sensible dans la valeur du rendement ; en effet, avec un rendement voisin de l'unité, il faut commettre une erreur grossière sur p pour qu'il en résulte une différence appréciable sur η.

Facteur de puissance des transformateurs. — Dans l'emploi des transformateurs, il est important de déterminer non seulement les pertes à vide qui constituent une dépense inutile pendant les heures de fonctionnement à circuit ouvert, mais aussi le facteur de puissance ou rapport des watts réels aux watts apparents, définis par le produit des volts et des ampères. Plus le facteur de puissance est faible, plus l'intensité du courant est considérable pour une puissance donnée à transformer et plus est grande la perte par effet Joule dans les câbles d'alimentation venant des machines génératrices.

Dans les bons transformateurs à circuit magnétique fermé, le facteur de puissance est déjà égal à 0,8 pour le dixième de la charge maxima et il s'approche de l'unité pour cette dernière charge. Avec les transformateurs à circuit magnétique ouvert, on ne dépasse guère 0,8 en pleine charge.

La détermination du facteur de puissance n'exige qu'une mesure au wattmètre faite simultanément avec des mesures au voltmètre et à l'ampèremètre.

Dérivations de flux magnétique dans les transformateurs. — Il est essentiel de réduire autant que possible les dérivations de flux qui se produisent particulièrement en pleine charge, lorsque les actions antagonistes des bobines primaire et secondaire tendent à créer des pôles conséquents dans le circuit magnétique. La diminution de la tension utile peut de ce chef être supé-

rieure à la chute de potentiel due au passage du courant dans la bobine secondaire.

Un moyen simple permettant de constater les dérivations de flux consiste à disposer dans le voisinage du transformateur un thermomètre à mercure et un thermomètre à alcool accolés. Les deux appareils accusent des températures différentes par suite de l'échauffement provoqué par les courants de Foucault que le flux perdu induit dans le mercure.

L'importance des dérivations magnétiques peut également s'apprécier en enroulant, autour des noyaux donnant lieu à des pertes, des bobines et en déterminant les forces électromotrices induites dans celles-ci.

Pertes par hystérésis dans les transformateurs. — Divers procédés peuvent être appliqués pour déterminer ces pertes.

Un moyen graphique, employé par MM. Ryan et Merritt, consiste à tracer par points la courbe de la différence de potentiel secondaire à circuit ouvert e_2, en utilisant une méthode analogue à celle de M. Joubert (chap. XXXIII), ainsi que la courbe du courant primaire i_1. Si l'alternateur qui engendre le courant employé n'est pas accessible, on peut se servir d'un petit moteur synchrone pour mouvoir le contact mobile nécessaire dans cette méthode. Les ordonnées de la courbe e_2 sont proportionnelles aux variations de celles de la courbe qui représente le flux magnétique en fonction du temps. A un instant donné, l'ordonnée de la courbe de la force électromotrice est donc égale au coefficient angulaire de la tangente au point correspondant de la courbe du flux. La phase de celle-ci est, d'ailleurs, en avance d'un quart de période sur la phase de la courbe e_2.

Après avoir calculé les ordonnées de la courbe du flux et celles de la courbe du courant i_1 qui le fait naître, on peut, en prenant les premières comme ordonnées et les valeurs correspondantes des secondes comme abscisses, tracer une courbe fermée représentant un cycle d'aimantation du noyau et dont l'aire est proportionnelle à la perte par hystérésis en une période. Dans un bon transformateur à circuit magnétique fermé, cette perte est d'ailleurs constante à toutes charges lorsque le voltage primaire est maintenu invariable.

Connaissant la perte par hystérésis, les pertes par effet Joule dans les deux enroulements et les pertes totales du transformateur mesurées par l'une des méthodes précédemment décrites, on peut déduire par différence les pertes par courants de Foucault.

Un autre moyen de séparer les pertes par hystérésis de celles par courants de Foucault consiste à calculer ces dernières et à les soustraire des pertes globales.

On sait que, si l'on appelle $\mathfrak{B}$ l'induction magnétique maxima dans le fer, déduite de la force électromotrice secondaire maxima, e l'épaisseur, en mm, des tôles de fer et n la fréquence, la perte par courants de Foucault est approximativement, en watts par cm³,

$$\left(\frac{en\mathfrak{B}}{2,5 \times 10^6}\right)^2.$$

On peut encore distinguer les pertes par hystérésis de celles dues aux courants de Foucault en remarquant que les premières sont proportionnelles à la fréquence et les secondes au carré de celle-ci. En déterminant les pertes totales dans le noyau à différentes fréquences et dans les mêmes conditions d'induction magnétique maxima, on peut évaluer l'importance de chacune des deux causes de perte en utilisant des formules semblables à celles de la méthode de M. Mordey (chap. XXXII).

On notera que les courants de Foucault induits dans les tôles du noyau d'un transformateur et circulant à peu près parallèlement aux côtés de la section transversale des tôles tendent à désaimanter l'intérieur de celles-ci. Il s'ensuit que, pour obtenir un flux total déterminé, il est nécessaire de majorer l'induction magnétique près de la surface. Ces effets sont toutefois négligeables quand l'épaisseur des lamelles est inférieure à 0,35 mm.

Si l'on veut déterminer la perte due à l'hystérésis du noyau, dans le cas de forces magnétisantes variant lentement, il suffit d'envoyer dans le circuit secondaire des courants variant par degrés et empruntés à une batterie d'accumulateurs, et d'observer les variations de flux correspondantes à l'aide d'un galvanomètre balistique relié à quelques spires de fil enroulées sur le noyau. Ce procédé, analogue à celui de M. Rowland (chap. XX), accuse, pour les mêmes limites de courant, une perte par hystérésis plus grande

que celle du transformateur en service, par suite de l'inertie magnétique du noyau.

Pendant plusieurs années, la question s'est posée de savoir si les pertes dans le noyau d'un transformateur sont constantes ou variables avec la charge, dans les mêmes conditions de force électromotrice. D'après les expériences les plus précises, la réponse est favorable à la constance des pertes.

Parmi les méthodes d'essai directes, la suivante est due à M. Ewing. On construit deux transformateurs d'expérience A et B, ayant les mêmes dimensions et pourvus de noyaux en fil de fer isolé au coton. Le circuit primaire de A est formé de deux couches de fil de cuivre enroulées dans le même sens; celui de B comprend deux couches enroulées en sens inverses. Il en est de même pour les enroulements secondaires. On met les primaires en série ainsi que les secondaires, après avoir eu soin de loger dans les noyaux des deux appareils les soudures d'un couple thermo-électrique dont le circuit comprend un galvanomètre. Le noyau de A s'échauffe par suite de l'hystérésis et des courants de Foucault qu'on réduit à une valeur négligeable en employant du fil de fer suffisamment fin. Le noyau de B est amené à la même température par un courant envoyé dans le fil de fer qui le compose. Les watts absorbés dans ce fil mesurent la perte dans le fer du noyau voisin.

Une cause d'erreur de cette méthode réside dans les courants de Foucault qui peuvent se former dans la masse du couple thermo-électrique. On pourrait comparer les échauffements par le procédé du bolomètre, basé sur la variation de résistance d'un fil de platine très ténu disposé dans le milieu dont on étudie la température.

Méthode de M. Kapp pour prédéterminer les caractéristiques des transformateurs. — Si l'on voulait déterminer les valeurs efficaces de la différence de potentiel secondaire d'un transformateur pour toutes les valeurs possibles de l'impédance du circuit d'utilisation, on serait obligé de faire un très grand nombre d'expériences en variant la résistance, la self-induction et la capacité secondaires, de manière à dresser des tableaux renseignant par interpolation le résultat correspondant à une impédance déterminée.

M. Kapp a indiqué une méthode qui, moyennant une simple expérience préalable, permet de trouver la valeur efficace de la différence de potentiel secondaire pour un circuit extérieur quelconque.

L'expérience consiste à mettre le secondaire en court-circuit sur un ampèremètre et à mesurer la différence de potentiel efficace primaire nécessaire pour donner au courant induit la valeur efficace normale.

Pour calculer la différence de potentiel secondaire en fonction de la différence de potentiel primaire, il faut tenir compte des dérivations magnétiques du transformateur. Soient $\mathcal{N}$ le flux commun aux deux enroulements de l'appareil, $\mathcal{N}_1$ le flux traversant la bobine primaire sans traverser la bobine secondaire et, de même, $\mathcal{N}_2$ le flux dispersé autour de cette dernière.

On peut admettre que les flux $\mathcal{N}_1$ et $\mathcal{N}_2$ sont proportionnels respectivement aux courants primaire et secondaire :

$$\mathcal{N}_1 = A i_1$$
$$\mathcal{N}_2 = B i_2.$$

Le secondaire étant en court-circuit, on a entre les valeurs instantanées des variables les relations

$$o = i_2 r_2 + n_2 \frac{d\mathcal{N}}{dt} + n_2 B \frac{di_2}{dt}$$
$$v'_1 = i_1 r_1 + n_1 \frac{d\mathcal{N}}{dt} + n_1 A \frac{di_1}{dt}.$$

En charge, on a sensiblement une différence de phase de 180° entre les courants primaire et secondaire et l'on peut écrire par approximation $i_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2$; les équations deviennent ainsi

$$o = i_2 r_2 + n_2 \frac{d\mathcal{N}}{dt} + B n_2 \frac{di_2}{dt}$$
$$v'_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2 r_1 + n_1 \frac{d\mathcal{N}}{dt} - A n_2 \frac{di_2}{dt}.$$

En soustrayant la seconde équation divisée par n_1 de la première divisée par n_2, on obtient :

$$i_2\left(\frac{r_2}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{r_1}{n_1}\right) + \left(A \frac{n_2}{n_1} + B\right) \frac{di_2}{dt} + \frac{v'_1}{n_1} = o.$$

L'expérience de court-circuit donne

$$v'_{1\text{eff}} \text{ et } i_{2\text{eff}}.$$

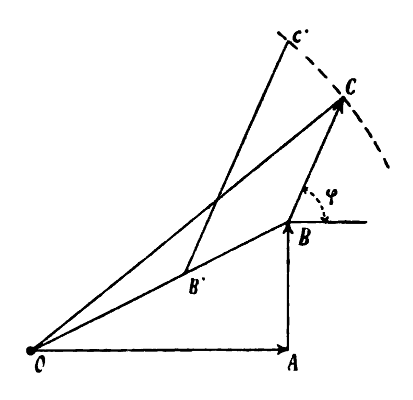


Fig. 217.

Connaissant les données de construction du transformateur, on peut donc construire, avec une longueur déterminée représentant 1 volt, le triangle rectangle OAB dont les valeurs

$$\frac{1}{n_1} v'_{1\text{eff}} \quad \text{et} \quad \left(\frac{r_2}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{r_1}{n_1}\right) i_{2\text{eff}}$$

sont respectivement l'hypothénuse BO et le côté OA. On trouve ainsi la valeur efficace AB de la perte de tension occasionnée par les fuites magnétiques.

Ce triangle ayant été arrêté par l'expérience préalable, il est possible de calculer la différence de potentiel secondaire $v_{2\text{eff}}$ pour un circuit extérieur d'impédance quelconque et pour une tension primaire $v_{1\text{eff}}$ déterminée. Soient r'_2 et $\mathcal{L}'_2$ la résistance et la self-induction extérieures données (dans le cas d'une capacité c, on prendra la self-induction équivalente $\mathcal{L}'_2 = -\frac{1}{a^2 c}$).

Les équations précédentes deviennent

$$o = i_2 r_2 + n_2 \frac{d\mathcal{N}}{dt} + \text{B}\, n_2 \frac{di_2}{dt} + v_2$$

$$v_1 = -\frac{n_2}{n_1} i_2 r_1 + n_1 \frac{d\mathcal{N}}{dt} - \text{A}\, n_2 \frac{di_2}{dt}.$$

En soustrayant de nouveau la seconde équation divisée par n_1 de la première divisée par n_2, il vient :

$$i_2\left(\frac{r_2}{n_2}+\frac{n_2}{n_1}\cdot\frac{r_1}{n_1}\right)+\left(A\frac{n_2}{n_1}+B\right)\frac{di_2}{dt}+\frac{v_2}{n_2}+\frac{v_1}{n_1}=0.$$

Pour trouver la valeur de $\frac{1}{n_2}v_{2\text{eff}}$, du point B on tire une droite BC inclinée par rapport à OA d'un angle $\varphi = \text{arc tang}\,\frac{a\mathfrak{L}'_2}{r'_2}$. Ensuite, du point O comme centre, on trace un arc de cercle de rayon $\frac{1}{n_1}v_{1\text{eff}}$; on limite ainsi la valeur BC. Celle-ci multipliée par n_2 représente la différence de potentiel secondaire cherchée.

Si l'on suppose que le courant secondaire varie, les côtés du triangle OAB changent dans le même rapport et, si l'on admet que $v_{1\text{eff}}$ reste constant, on obtiendra la nouvelle valeur de $v_{2\text{eff}}$ en traçant du point B' trouvé une parallèle B' C' à BC. Quand le courant secondaire est nul, le vecteur $\frac{1}{n_1}v_{1\text{eff}}$ se confond avec $\frac{1}{n_2}v_{2\text{eff}}$.

Renseignements pratiques

PROPRIÉTÉS DES CONDUCTEURS ÉLECTRIQUES INDUSTRIELS (Hospitalier).

MÉTAUX ET ALLIAGES.	Densité en gr. par cm³.	Ténacité en kg. par mm².	Conductibilité relative au cuivre pur de Matthiessen en pour 100.	Résistibilité à 0° C en microhms-cm.	Coefficient *moyen* de température vers 20° C.	Fil de 1 mm de diamètre. S. = 0,7854 mm². Résistance linéaire à 0° C en ohms par km.	Fil de 1 mm de diamètre. S. = 0,7854 mm². Masse linéaire en kg. par km.	Observations.
Cuivre étalon	8,9	26,7	100	1,598	0,00388	20,29	6,97	*Matthiessen* (réduit à l'ohm international).
Cuivre électrolytique Swan . .	8,91	»	102,05	1,561	0,00428	20,00	7,00	*Dewar et Fleming* (1893).
Cuivre électrolytique Grammont.	9,05	»	103,6	1,538	0,00445	19,58	7,11	Recuit. *Lagarde* (1893).
Fer pur (Hopkins et Williams).	7,8	»	17,5	9,065	0,00625	115,4	6,13	*Dewar et Fleming* (1893).
Fil d'acier	7,8	100	10,8	15,803	0,00390	201,2	—	Administration des télégraphes. *Lagarde* (1888).
Fil de fer homogène	7,8	»	12,0	13,273	0,00414	169,0	—	— —
— ordinaire.	7,8	38	11,4	13,906	0,00426	177,0	—	— —
Acier au manganèse	7,81	160	2,1	75	0,00136	954,8	—	
Bronze phosphoreux (haute conductibilité)	8,91	44,9	98 à 100	1,6	»	20,37	7,0	Fils Montefiore. *Rousseau* (1887).
Bronze phosphoreux (fils télégraphiques)	—	48	99	1,6	0,00394	20,37	—	— —
Bronze phosphoreux (fils téléphoniques)	—	82	28	5,6	0,00394	71,3	—	— —
Bronze silicieux (A).	—	45	97	1,67	0,00152	21,28	—	*Lazare Weiller* (1892).
— — (B).	—	50	85	1,79	—	22,85	—	—
— — (F).	—	100	20	7,80	—	153,00	—	
Bronze chromé télégraphique.	8,92	45	98,5	1,641	»	20,89	7,03	*Mouchet.*
Bronze chromé téléphonique .	—	75	34,5	4,710	»	59,96	—	—
Bronze chromé, longue portée.	—	100 à 110	20	7,800	»	153,00	—	—
Bronze à 2 pour 100 d'étain. .	»	75	35	4,57	0,00152	57,9	»	Administration des télégraphes. *Lagarde* (1888).
Bronze d'aluminium à 10 pour 100	7,7	»	12,9	12,31	0,00105	156,8	6,05	Métal recuit. *Limb* (1892).
Fil bimétallique Martin . . .	8,3	75 à 80	60	2,67	»	33,9	6,52	*Compagnie française du Bimétal.*
Platinoïde	8,78	60	4,8	33,0	0,00024	421,7	6,89	*Martino* (1885).
Ferro-nickel, type 4X	8,4	70 à 90	2	78,3	0,00093	997,0	6,60	Recuit.
Maillechort.	8,62	»	5,3	30,0	0,00036	381,9	6,75	Cu (60), Zn (25), Ni (15).
Métal blanc Grammont, écroui.	»	»	6,6	24,0	0,0002	305,3	»	*Limb* (1892).
Métal blanc Grammont, recuit.	»	»	7	22,7	0,00039	289,2	»	—
Constantan.	9,52	»	3,2	50,0	— 0,00003	636,6	»	*Basse et Selve* (Altena).
Cuivre à 30 pour 100 de manganèse	»	»	1,6	100,6	0,00004	1282,2	»	*K. Feussner et Lindeck* (1891).
Cu (73), Ni (3), Mn (24) . . .	»	»	3,3	47,7	0,00003	607,3	»	— —
Cu (75), Ni (25)	»	»	4,7	34,2	0,00019	440,9	»	— —
Rhéotan	»	»	3	52,5	0,00023	682,5	»	— —
Nickeline d'Obermaier (A) . .	»	»	4,7	33,2	0,00030	435,4	»	— —
— — (B) . .	»	»	3,5	44,8	0,00033	557,7	»	— —
Manganine	8,50	»	3,7	46,7	± 0,00001	591,1	7,06	— —

RÉSISTANCE EN OHMS

Pour des diamètres de 0,05 à 4,0 mm et des résistibilités

Diamètre.	Cuivre.					Bronze.				
mm	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00	6,00
0,05	8,14	8,65	9,16	9,67	10,10	12,73	15,3	20,4	25,5	30,6
0,10	2,04	2,16	2,29	2,42	2,55	3,18	3,8	5,1	6,4	7,6
0,15	0,91	0,96	1,02	1,08	1,13	1,41	1,70	2,26	2,83	3,4
0,20	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,80	0,95	1,27	1,59	1,91
0,25	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,51	0,61	0,81	1,02	1,22
0,30	0,226	0,240	0,255	0,269	0,283	0,354	0,424	0,566	0,707	0,849
0,35	0,166	0,177	0,187	0,198	0,208	0,260	0,312	0,416	0,520	0,624
0,40	0,127	0,135	0,143	0,151	0,159	0,199	0,239	0,318	0,398	0,477
0,45	0,101	0,107	0,113	0,120	0,126	0,157	0,189	0,252	0,314	0,377
0,50	0,081	0,087	0,092	0,097	0,102	0,127	0,153	0,204	0,255	0,306
0,55	0,067	0,072	0,076	0,080	0,084	0,105	0,126	0,168	0,210	0,253
0,60	0,057	0,060	0,064	0,067	0,071	0,088	0,106	0,141	0,177	0,212
0,65	0,048	0,051	0,054	0,057	0,060	0,075	0,090	0,120	0,151	0,181
0,70	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052	0,065	0,078	0,104	0,130	0,156
0,75	0,036	0,038	0,041	0,043	0,045	0,057	0,068	0,091	0,113	0,136
0,80	0,0318	0,0338	0,0358	0,0378	0,0398	0,0497	0,060	0,080	0,099	0,119
0,85	0,0282	0,0299	0,0317	0,0335	0,0352	0,0441	0,053	0,070	0,088	0,106
0,90	0,0251	0,0267	0,0283	0,0299	0,0314	0,0393	0,047	0,063	0,079	0,094
0,95	0,0226	0,0240	0,0254	0,0268	0,0282	0,0353	0,042	0,056	0,071	0,085
1,00	0,0204	0,0216	0,0229	0,0242	0,0255	0,0318	0,038	0,051	0,064	0,076
1,1	0,0168	0,0179	0,0190	0,0200	0,0210	0,0263	0,0316	0,0421	0,0526	0,063
1,2	0,0141	0,0150	0,0159	0,0168	0,0177	0,0221	0,0265	0,0354	0,0442	0,053
1,3	0,0121	0,0128	0,0136	0,0143	0,0151	0,0188	0,0226	0,0301	0,0377	0,045
1,4	0,0104	0,0110	0,0117	0,0123	0,0130	0,0162	0,0195	0,0260	0,0325	0,039
1,5	0,0091	0,0096	0,0102	0,0108	0,0113	0,0141	0,0170	0,0226	0,0283	0,034
1,6	0,0080	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0124	0,0149	0,0199	0,0249	0,0298
1,7	0,0071	0,0075	0,0079	0,0084	0,0088	0,0110	0,0132	0,0176	0,0220	0,0264
1,8	0,0063	0,0067	0,0071	0,0075	0,0079	0,0098	0,0118	0,0157	0,0196	0,0236
1,9	0,0056	0,0060	0,0064	0,0067	0,0071	0,0088	0,0106	0,0141	0,0176	0,0212
2,0	0,0051	0,0054	0,0057	0,0060	0,0064	0,0080	0,0095	0,0127	0,0159	0,0191
2,2	0,00421	0,00447	0,00473	0,00500	0,00526	0,0066	0,0079	0,0105	0,0132	0,0158
2,4	0,00354	0,00376	0,00398	0,00420	0,00442	0,0055	0,0066	0,0088	0,0111	0,0133
2,6	0,00301	0,00320	0,00339	0,00358	0,00377	0,0047	0,0057	0,0075	0,0094	0,0113
2,8	0,00260	0,00274	0,00292	0,00308	0,00325	0,0041	0,0049	0,0065	0,0081	0,0097
3,0	0,00226	0,00240	0,00255	0,00269	0,00283	0,0035	0,0042	0,0057	0,0071	0,0085
3,2	0,00199	0,00211	0,00224	0,00236	0,00249	0,00311	0,00373	0,00497	0,0062	0,0075
3,4	0,00176	0,00187	0,00198	0,00209	0,00220	0,00275	0,00330	0,00441	0,0055	0,0066
3,6	0,00157	0,00167	0,00177	0,00187	0,00196	0,00246	0,00295	0,00393	0,0049	0,0059
3,8	0,00141	0,00150	0,00159	0,00168	0,00177	0,00221	0,00265	0,00353	0,0044	0,0053
4,0	0,00127	0,00135	0,00143	0,00151	0,00159	0,00199	0,00239	0,00318	0,0040	0,0048

DE 1 MÈTRE DE FIL

de 1,6 à 60,0 microhms-cm (Grawinkel et Strecker).

Platine, fer.				Maillechort.				Nickeline, Rhéotan, Manganine.		Diamètre.
7,00	8,00	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0	60,0	mm
36	41	51	76	102	127	153	204	255	306	0,05
8,9	10,2	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	76	0,10
4,0	4,5	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	34	0,15
2,23	2,55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	19,1	0,20
1,43	1,63	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	12,2	1,25
0,99	1,13	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	8,49	0,30
0,73	0,83	1,04	1,56	2,08	2,60	3,12	4,16	5,20	6,24	0,35
0,56	0,64	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	4,77	0,40
0,44	0,50	0,63	0,94	1,26	1,57	1,89	2,52	3,14	3,77	0,45
0,36	0,41	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	3,06	0,50
0,295	0,337	0,421	0,63	0,84	1,05	1,26	1,68	2,10	2,53	0,55
0,248	0,283	0,354	0,53	0,71	0,88	1,06	1,41	1,77	2,12	0,60
0,211	0,241	0,301	0,45	0,60	0,75	0,90	1,21	1,51	1,81	0,65
0,182	0,208	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	1,56	0,70
0,158	0,181	0,226	0,34	0,45	0,57	0,68	0,91	1,13	1,36	0,75
0,139	0,159	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,19	0,80
0,123	0,141	0,176	0,264	0,352	0,441	0,53	0,70	0,88	1,06	0,85
0,110	0,126	0,157	0,236	0,314	0,393	0,47	0,63	0,79	0,94	0,90
0,099	0,113	0,141	0,212	0,282	0,353	0,42	0,56	0,71	0,85	0,95
0,089	0,102	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0,64	0,76	1,00
0,074	0,084	0,105	0,158	0,210	0,263	0,316	0,421	0,526	0,63	1,1
0,062	0,071	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0 53	1,2
0,053	0,060	0,075	0,113	0,151	0,188	0,226	0,301	0,377	0,45	1,3
0,045	0,052	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,39	1,4
0,040	0,045	0,057	0,085	0,113	0,141	0,170	0,226	0,283	0,34	1,5
0,0348	0,0398	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,298	1,6
0,0308	0,0352	0,0441	0,066	0,088	0,110	0,132	0,176	0,220	0,264	1,7
0,0275	0,0314	0,0393	0,059	0,079	0,098	0,118	0,157	0,196	0,236	1,8
0,0247	0,0282	0,0353	0,053	0,071	0,088	0,106	0,141	0,176	0,212	1,9
0,0223	0,0255	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,191	2,0
0,0184	0,0210	0,0263	0,0395	0,0526	0,066	0,079	0,105	0,132	0,158	2,2
0,0155	0,0177	0,0221	0,0332	0,0442	0,055	0,066	0,088	0,111	0,133	2,4
0,0132	0,0151	0,0188	0,0283	0,0377	0,047	0,057	0,075	0,094	0,113	2,6
0,0114	0,0130	0,0162	0,0244	0,0325	0,041	0,049	0,065	0,081	0,097	2,8
0,0099	0,0113	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,085	3,0
0,0087	0,0100	0,0124	0,0187	0,0249	0,0311	0,0373	0,0497	0,062	0,075	3,2
0,0077	0,0088	0,0110	0,0165	0,0220	0,0275	0,0330	0,0441	0,055	0,066	3,4
0,0069	0,0079	0,0098	0,0147	0,0196	0,0246	0,0295	0,0393	0,049	0,059	3,6
0,0062	0,0071	0,0088	0,0133	0,0177	0,0221	0,0265	0,0353	0,044	0,053	3,8
0,0056	0,0064	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,048	4,0

La résistance d'un fil de cuivre commercial étant r ohms, pour une élévation de température de t^{o} C la résistance devient $r + 0{,}0037\ rt$. La table ci-dessous donne les produits $0{,}0037\ rt$ (Grawinkel et Strecker).

r Ohms.	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
2	0,015	0,030	0,044	0,059	0,074	0,089	0,104	0,118	0,133	0,148	0,163	0,178	0,192	0,207	0,222
4	0,030	0,059	0,089	0,118	0,148	0,178	0,207	0,237	0,266	0,296	0,326	0,355	0,385	0,414	0,444
6	0,044	0,089	0,133	0,178	0,222	0,266	0,311	0,355	0,400	0,444	0,488	0,533	0,577	0,622	0,666
8	0,059	0,118	0,178	0,237	0,296	0,355	0,414	0,474	0,533	0,592	0,651	0,710	0,770	0,829	0,888
10	0,074	0,148	0,222	0,296	0,370	0,444	0,518	0,592	0,666	0,740	0,814	0,888	0,962	1,036	1,110
12	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53	0,62	0,71	0,80	0,89	0,98	1,07	1,15	1,24	1,33
14	0,10	0,21	0,31	0,41	0,52	0,62	0,73	0,83	0,93	1,04	1,14	1,24	1,35	1,45	1,55
16	0,12	0,24	0,36	0,47	0,59	0,71	0,83	0,95	1,07	1,18	1,30	1,42	1,54	1,66	1,78
18	0,13	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80	0,93	1,07	1,20	1,33	1,47	1,60	1,73	1,86	2,00
20	0,15	0,30	0,44	0,59	0,74	0,89	1,04	1,18	1,33	1,48	1,63	1,78	1,92	2,07	2,22
22	0,16	0,33	0,49	0,65	0,81	0,98	1,14	1,30	1,47	1,63	1,79	1,95	2,12	2,28	2,44
24	0,18	0,36	0,53	0,71	0,89	1,07	1,24	1,42	1,60	1,78	1,95	2,13	2,31	2,49	2,66
26	0,19	0,38	0,58	0,77	0,96	1,15	1,35	1,54	1,73	1,92	2,12	2,31	2,50	2,69	2,89
28	0,21	0,41	0,62	0,83	1,04	1,24	1,45	1,66	1,86	2,07	2,28	2,49	2,69	2,90	3,11
30	0,22	0,44	0,67	0,89	1,11	1,33	1,55	1,78	2,00	2,22	2,44	2,66	2,89	3,11	3,33
35	0,26	0,52	0,78	1,04	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,4	3,6	3,9
40	0,30	0,59	0,89	1,18	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,1	4,4
45	0,33	0,67	1,00	1,33	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0
50	0,37	0,74	1,11	1,48	1,8	2,2	2,6	3,0	3,3	3,7	4,1	4,4	4,8	5,2	5,5
55	0,41	0,81	1,22	1,63	2,0	2,4	2,8	3,3	3,7	4,1	4,5	4,9	5,3	5,7	6,1
60	0,44	0,89	1,33	1,78	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,4	4,9	5,3	5,8	6,2	6,7
65	0,48	0,97	1,44	1,93	2,4	2,9	3,4	3,9	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,2
70	0,52	1,04	1,55	2,07	2,6	3,1	3,6	4,1	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7	7,3	7,8
75	0,55	1,11	1,66	2,22	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	5,5	6,1	6,7	7,2	7,8	8,3
80	0,59	1,18	1,78	2,37	3,0	3,6	4,1	4,7	5,3	5,9	6,5	7,1	7,7	8,3	8,9
85	0,63	1,26	1,89	2,52	3,1	3,8	4,4	5,0	5,7	6,3	6,9	7,5	8,2	8,8	9,4
90	0,67	1,33	2,00	2,66	3,3	4,0	4,7	5,3	6,0	6,7	7,3	8,0	8,7	9,3	1,00
95	0,70	1,41	2,11	2,81	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7	8,4	9,1	9,8	1,06
100	0,74	1,48	2,22	2,96	3,7	4,4	5,2	5,9	6,7	7,4	8,1	8,9	9,6	10,4	1,11

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES
(*Trötsch Kohlr*)

ELECTROLYTE.	Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution.	Poids spécifique.	Résistance en ohms d'un dcm³.	Diminution de résistance par degré centigrade en pour cent.
KCl . . . . 18°	2,4	1,0135	2,91	2,19
»	5,0	1,0308	1,463	2,02
»	8,0	1,0519	0,820	2,00
»	10	1,0638	0,742	1,89
»	15	1,0978	0,499	1,80
»	19,3	1,1308	0,383	1,71
»	20	1,1335	0,377	1,69
»	25	1,1408	0,359	1,67
NH^4Cl . . . . . . 18°	4,76	1,0118	1,159	2,09
»	5	1,0142	1,098	1,99
»	10	1,0289	0,568	1,87
»	15	1,0430	0,390	1,72
»	19,9	1,0553	0,307	1,66
»	20	1,0571	0,299	1,62
»	25	1,0710	0,250	1,55
$NaCl$ . . . . 18°	5	1,0345	1,502	2,18
»	10	1,0707	0,833	2,15
»	15	1,1087	0,615	2,13
»	20	1,1477	0,515	2,17
»	25	1,1898	0,472	2,28
»	26	1,1982	0,469	2,31
»	26,4	1,2014	0,468	2,34
$CaCl^2$ . . . . 18°	5	1,0409	1,569	2,14
»	10	1,0852	0,884	2,07
»	15	1,1311	0,670	2,03
»	20	1,1794	0,583	2,01
»	25	1,2305	0,566	2,05
»	30	1,2841	0,608	2,17
»	35	1,3420	0,738	2,37
$CuCl^2$ . . . . 18°	1,35	1,0123	5,82	2,29
»	9	1,0828	1,40	2,00
»	18,2	1,1985	0,97	1,94
»	28,75	1,3443	1,12	2,26
»	35	1,4518	1,44	2,70
KNO^3 . . . . 18°	5	1,0305	2,214	2,09
»	10	1,0632	1,200	2,06
»	15	1,097	0,848	2,03
»	20	1,133	0,668	1,98
»	22	1,148	0,619	1,95
$NaNO^3$ . . . . . . 18°	5	1,0327	2,312	2,22
»	10	1,0681	1,288	2,19
»	20	1,1435	0,773	2,16
»	30	1,2278	0,628	2,21

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES (SUITE)

(Trötsch Kohlr)

ÉLECTROLYTE.	Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution.	Poids spécifique.	Résistance en ohms d'un dcm^3.	Diminution de résistance par degré centigrade en pour cent.
$Ag\,NO^3$ . . . . . 18°	5	1,0422	3,947	2,19
»	15	1,1404	1,478	2,16
»	25	1,2555	0,953	2,11
»	35	1,3945	0,717	2,08
»	45	1,5705	0,588	2,05
»	55	1,7895	0,509	2,07
»	60	1,9158	0,408	2,10
$Na^2\,SO^4$ . . . . . . 15°	5	1,0450	2,46	2,37
»	10	1,0915	1,46	2,50
»	15	1,1426	1,13	2,57
$Mg\,SO^4$ . . . . 15°	5	1,0510	3,81	2,27
»	10	1,1052	2,43	2,42
»	15	1,1602	2,09	2,53
»	20	1,2200	2,11	2,70
»	25	1,2861	2,42	2,90
$Zn\,SO^4$. . . . . . . 18°	5	1,0509	5,27	2,26
»	10	1,1069	3,13	2,24
»	15	1,1675	2,42	2,29
»	20	1,2323	2,14	2,42
»	25	1,3045	2,09	2,59
»	30	1,3788	2,26	2,74
$Cu\,SO^4$ . . . . . . 18°	2,5	1,0246	9,24	2,14
»	5	1,0513	5,32	2,17
»	10	1,1073	3,14	2,19
»	15	1,675	2,38	2,32
»	17,5	1,2003	2,19	2,37
$Fe\,SO^4$ . . . . . . 18°	0,37	1,0344	6,50	2,18
»	4,9	1,0476	5,03	2,17
»	7,9	1,0692	3,844	2,18
»	13,3	1,1375	2,575	2,23
»	18,9	1,2018	2,180	2,31
$K^2\,CO^3$. . . . . . . 15°	5	1,0449	1,79	2,22
»	10	1,0919	0,967	2,13
»	20	1,1920	0,569	2,11
»	30	1,3002	0,452	2,20
»	40	1,4170	0,463	2,47
»	50	1,5728	0,864	3,20
$Na^2\,CO^3$ . . . . . . 18°	5	1,0511	2,23	2,53
»	10	1,1044	1,43	2,72
»	15	1,1590	1,20	2,95
KOH . . . . 15°	4,2	1,0382	0,685	1,88
»	12,6	1,1177	0,267	1,89
»	21,6	1,2088	0,197	2,00
»	29,4	1,2908	0,185	2,22
»	37,8	1,3803	0,210	2,58

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES (suite)

(Trotsch Kohlr)

ÉLECTROLYTE.		Nombre de grammes de sel pour 100 grammes de solution.	Poids spécifique.	Résistance en ohms d'un dcm^3.	Diminution de résistance par degré centigrade en pour cent.
Na OH.	15°	2,5	1,0280	0,924	1,95
»		5	1,0568	0,510	2,02
»		10	1,1131	0,321	2,18
»		20	1,2262	0,307	3,01
»		30	1,3374	0,497	4,50
»		40	1,4421	0,866	6,52
$H^2 SO^4$.	18°	2,5	1,0161	0,924	1,15
»		5	1,0331	0,482	1,21
»		10	1,0673	0,257	1,28
»		20	1,1414	0,154	1,45
»		30	1,2207	0,136	1,62
»		50	1,3984	0,186	1,93
»		70	1,6146	0,467	2,56
»		90	1,8167	0,938	3,20
H Cl	10°	5	1,0242	0,255	1,59
»		10	1,0490	0,159	1,57
»		15	1,0744	0,135	1,56
»		20	1,1001	0,132	1,55
»		25	1,1262	0.139	1,54
»		30	1,1524	0,152	1,53
»		35	1,1775	0,170	1,52
»		40	1,2007	0,195	—
$H^2 C^4 HO^4$	18°	5	1,0216	16,8	1,86
»		10	1,0454	12,3	1,91
»		20	1,0950	10,1	1,87
»		30	1,1484	10,4	2,00
»		40	1,2064	12,8	2,23
»		50	1,2672	189	2,65
$H C^2 H^3 O^2$	18°	5	1,0058	82	1,63
»		10	1,0133	66	1,69
»		20	1,0257	62	1,79
»		30	1,0393	71	1,86

Valeurs de la force magnétisante $\mathcal{H}$ dans la période descendante et dans la période ascendante du magnétisme pour divers métaux employés dans les dynamos (Grawinkel et Strecker).

$\mathfrak{B}$	Fer de Suède		Fer forgé		Fer fondu		Aciers pour dynamos							
							1		2		3		4	
	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
0	— 1,1	+ 1,3	— 2,9	+ 2,9	— 2,4	+ 2,2	— 1,6	+ 1,8	— 1,4	+ 1,7	— 2,0	+ 2,0	— 1,8	+ 1,8
5000	0,8	1,8	1,9	4,3	1,6	3,1	1,0	2,5	0,9	2,4	1,0	3,0	1,1	2,9
6000	0,6	2,0	1,5	5,0	1,2	3,5	0,7	2,8	0,6	2,8	0,8	3,5	0,9	3,4
7000	0,4	2,2	1,1	5,5	1,0	3,8	0,5	3,1	0,2	3,1	0,6	4,0	0,6	3,9
8000	0,2	2,5	0,7	6,4	0,6	4,2	0,2	3,5	+ 0,2	3,5	0,3	4,5	+ 0,1	4,5
9000	0	2,7	0,1	7,5	0	4,9	+ 0,1	4,2	0,5	4,0	0	5,1	0,6	5,5
10000	+ 0,2	3,2	+ 0,7	8,8	+ 0,8	5,6	0,5	5,1	1,2	4,9	+ 0,4	6,2	1,2	6,4
11000	0,9	4,2	1,8	10,4	1,8	6,8	1,1	6,2	2,1	6,0	1,0	7,3	2,6	8,1
12000	1,9	5,5	3,5	12,8	3,0	8,2	1,9	8,0	3,2	7,8	2,0	9,0	3,9	10,3
13000	3,6	7,8	5,9	16,5	4,6	10,5	3,1	10,7	4,9	10,6	3,5	11,5	6,0	13,4
14000	8,0	13,5	10,8	22,4	7,2	13,9	6,5	15,2	8,2	15,1	6,2	16,2	9,7	18,2
15000	21,9	26,1	24,6	35,4	12,1	20,3	15,3	24,2	17,0	24,5	13,5	24,2	18,0	26,6
16000	54,5	57,5	54,2	61,0	26,7	34,0	37,5	43,5	41,5	46,0	33,0	38,7	40,0	46,0
17000	109,0	109	105,0	105	58,5	63,0	75	77,0	82,0	83,0	80,0	80,0	80,0	85,0

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES FERS ET ACIERS (J. HOPKINSON).

NATURE de L'ÉCHANTILLON.	TREMPE.	ANALYSE CHIMIQUE.						RÉSISTANCE spécifique en micro-ohms-cm.	INDUCTION maxima.	INDUCTION résiduelle.	ÉNERGIE dissipée en ergs par cm³.
		Carbone total.	Manganèse.	Soufre.	Silicium.	Phosphore.	Divers.				
Fer forgé.	Recuit.	»	»	»	»	»	»	13,78	18 251	7 248	13 356
Fonte malléable.	—	»	»	»	»	»	»	32,54	12 408	7 479	34 742
Fonte grise.	»	»	»	»	»	»	»	105,60	10 783	3 028	13 037
Acier Bessemer doux.	»	0,045	0,200	0,030	0	0,046	»	10,50	18 196	7 860	17 137
Acier Whitworth doux.	Recuit.	0,090	0,153	0,016	0	0,042	»	10,80	19 840	7 080	10 289
—	—	0,320	0,438	0,017	0,042	0,035	»	14,46	18 736	9 840	40 120
—	Trempé à l'huile.	0,320	0,438	0,017	0,042	0,035	»	13,90	18 796	11 040	65 786
—	Recuit.	0,890	0,165	0,005	0,081	0,019	»	15,59	16 120	10 740	42 366
—	Trempé à l'huile.	0,890	0,165	0,005	0,081	0,019	»	16,95	16 120	8 736	99 401
Acier manganésifère.	Forgé.	0,674	4,730	0,023	0,0608	0,078	»	53,68	4 623	2 202	34 567
—	Recuit.	0,674	4,730	0,023	0,0608	0,078	»	39,28	10 578	5 848	113 963
—	Trempé à l'huile.	0,674	4,730	0,023	0,0608	0,078	»	50,56	4 709	2 158	41 941
—	Forgé.	1,298	8,740	0,024	0,094	0,072	»	69,93	747	»	»
—	Recuit.	1,298	8,740	0,024	0,094	0,072	»	63,16	1 985	540	15 474
—	Trempé à l'huile.	1,298	8,740	0,024	0,094	0,072	»	70,66	733	»	»
Acier silicié.	Forgé.	0,685	0,694	0,024	3,438	0,133	»	61,63	15 148	11 073	45 740
—	Recuit.	0,685	0,694	0,024	3,438	0,133	»	61,85	14 701	8 149	36 485
—	Trempé à l'huile.	0,685	0,694	0,024	3,438	0,133	»	61,95	14 696	8 084	59 619
							Chrome				
Acier chromé.	Forgé.	0,532	0,393	0,020	0,220	0,041	0,621	20,16	15 778	9 318	61 439
—	Recuit.	0,532	0,893	0,020	0,220	0,041	0,621	19,42	14 848	7 570	42 425
—	Trempé à l'huile.	0,532	0,393	0,020	0,220	0,041	0,621	27,08	13 960	8 595	169 455
—	Forgé.	0,687	0,28	0,020	0,134	0,043	1,195	17,91	14 680	7 568	85 944
—	Recuit.	0,687	0,28	0,020	0,134	0,043	1,195	18,49	13 233	6 489	64 842
—	Trempé à l'huile.	0,687	0,28	0,020	0,134	0,043	1,195	30,35	12 868	7 891	167 050
							Tungstène				
Acier au tungstène.	Forgé.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,49	15 718	10 144	78 568
—	Recuit.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,50	16 498	11 008	80 315
—	Trempé à l'eau froide.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,74	»	»	»
—	» » tiède.	1,357	0,36	0	0,043	0,047	4,649	22,49	15 610	9 482	149 500
—	» à l'huile.	0,511	0,625	0	0,021	0,028	3,444	36,04	14 480	8 643	216 864
—	» dur.	0,855	0,312	»	0,151	0,089	2,353	44,27	12 133	6 818	197 660
							Graphite				
Fonte grise.	»	3,455	0,173	0,042	2,044	0,151	2,064	114,00	9 148	3 161	39 789
Fonte truitée.	»	2,581	0,610	0,105	1,476	0,435	1,477	62,86	10 546	5 108	41 072
Fonte blanche.	»	2,036	0,380	0,467	0,764	0,458	0	54,61	9 342	5 554	36 383
Spiegeleisen.	»	4,510	7,970	traces	0,502	0,128	»	105,20	385	77	»

TABLEAU DE CONVERSION DES UNITÉS FRANÇAISES ET ÉTRANGÈRES

EN UNITÉS MÉTRIQUES ET C. G. S. (HOSPITALIER).

Règle d'emploi. — *Pour transformer l'expression de la valeur numérique d'une grandeur, exprimée dans l'une des unités inscrites dans la colonne* **A**, *dans l'une des unités inscrites dans la colonne* **C**, *il faut multiplier cette valeur numérique par le facteur correspondant de la colonne* **B**.

Exemple : 10 *acres* = 10 . 4046,71 = 40 467,1 mètres-carrés.

Les unités de mesure étrangères sont indiquées en italiques dans le tableau avec les noms qu'elles portent dans leurs pays respectifs.

A.	B.	C.
1 ***Abassis*** (Perse) . . .	41	centimes.
1 *acre* (Angleterre) . . .	4 046,71	m^2.
1 ampère	10^{-1}	unité C. G. S. de courant.
1 ampère-heure	3 600	coulombs.
1 ampère-tour	1,256	gilbert ou unité C. G. S. de force magnétomotrice.
1 *archine* (Russie) . . .	71,119	cm.
1 *archine* (Turquie). . .	75,774	centimètres.
1 année civile	365,242	jours solaires moyens.
1 —	8 765	heures, 48 min, 49,7 sec.
1 —	31 556 929,7	secondes.
1 année sidérale	365,256	jours solaires moyens.
1 atmosphère	1,0333	kg : cm^2.
1 —	1,0136	barie.
1 ***Banabat*** (Perse) . . .	1,04	franc.
1 *banu* (Roumanie). . .	1	centime.
1 barie (ou barad) . . .	1	mégadyne : cm^2.
1 *berkowetz* (Russie) . .	163,1	kilogrammes.
1 *bolivar* (Vénézuela) . .	1	franc.
1 *board of Trade Unit* (B. T. U.) (Angleterre) . .	1	kilowatt-heure.
1 bougie décimale . . .	0,1	bec Carcel.
1 — . . .	0,05	étalon Violle.
1 *bushell* (8 gallons) (Angleterre).	36,3477	litres.

A.	B.	C.
1 **Calorie** (kg-d)	425	kilogrammètres.
1 —	4 170	joules.
1 —	1,158	watt-heure.
1 calorie (kg-d) par seconde.	4 170	watts.
1 —	5,77	chevaux.
1 *candle* (Angleterre) . .	1,05	bougie décimale
1 *candle-feet* (Angleterre).	10,7	bougie à 1 mètre.
1 carat	205,5	milligrammes.
1 *cent* (Etats-Unis) . . .	5,18	centimes.
1 *cent* (Pays-Bas) . . .	21	centimes.
1 *cent per mile* (Etats-Unis)	3,24	centimes par kilomètre.
1 *cent per pound*	11,5	centimes par kilogramme.
1 centimètre de mercure .	0,0136	kg : cm².
76 centimètres de mercure.	1	atmosphère.
75 — — .	1	barie.
1 *chain* (22 yards) (Angleterre).	20,11644	mètres
1 *chaldron* (12 sacks) (Angleterre).	13,08516	hectolitres.
1 cheval-heure	270 000	kilogrammètres.
1 cheval-heure	635,3	calories (kg-d).
1 cheval (vapeur) . . .	75	kgm : s.
1 — . . .	7 360	meg-ergs : s.
1 — . . .	736	watts.
1 circonférence	6,2832	radians.
1 *circular mil*	0,0005067	millimètre-carré.
1 coulomb	10^{-1}	unités C. G. S. de quantité.
1 *couronne* (Autriche) . .	1,05	franc.
1 *cubic-inch* (Angleterre).	16,387	cm³.
1 *cubic-foot* — .	28,316	dm³.
1 *cubic-foot per pound* (Angleterre).	62,5	dm³ par kg.
1 *cubic-yard* —	0,7645	m³.
1 *cwt* (Hundredweight) —	50,8	kg.
1 **Degré**	0,01745	radian.
1 *dinar* (Serbie)	1	franc.
1 *dime* (Etats-Unis) . .	51,8	centimes.
1 *dollar* ($) (Etats-Unis).	5,1825	francs.
1 *dollar per pound* . . .	11,4	francs par kilogramme.
1 *drachma* (avoirdupois).	1,7818	gramme.
1 *drachme* (Grèce) . . .	1	franc.
1 *dram* (avoirdupois) . .	1,7719	gramme.
1 dyne	1,01937	milligramme.
1 dyne	1	unité C. G. S. de force.
1 dyne-seconde	1	unité C. G. S. de quantité de mouvement.
1 ***El*** (Hollande)	1	mètre.
1 *endazé* (Turquie) . . .	68	mètres.

A.	B.	C.
1 erg	0,00102	gramme-centimètre.
1 —	1	unité C. G. S. de travail.
1 erg par seconde . . .	1	unité C. G. S de puissance.
1 — . . .	10^{-7}	watt.
1 **Farad**.	10^{-9}	unité C. G. S. de capacité.
1 *farthing* (Angleterre) .	2,5	centimes.
1 *fathom* (2 yards). . .	1,8288	m.
1 *florin* (Angleterre) . .	2,47	francs.
1 *florin* (Autriche, Pays-Bas)	2,1	francs.
1 *foot* (Angleterre) . . .	30,4795	cm.
1 *foot-grain* (Angleterre) .	1 937	ergs.
1 — — .	1,995	gramme-cm.
1 *foot-pound*	1,3565	joule.
1 —	13,56	meg-ergs.
1 —	0,1383	kgm.
1 *foot-lb per pound* (Angl.)	0,305	kgm. par kg.
1 *foot-ton*.	309	kilogrammètres.
1 *founte* (Russie). . . .	409,512	grammes.
1 *furlong*	201,1644	mètres.
1 **Gallon** (Angleterre) . .	4,5435	litres.
1 — (Etats-Unis) . .	3,7854	—
1 gauss	1	unité C. G. S. d'induction magnétique.
1 gilbert.	1	unité C. G. S. de force magnétomotrice.
1 gilbert.	0,8	ampère-tour.
1 *gill* (Angleterre) . . .	0,14198	litre.
1 *gourde* (Haïti)	5	francs.
1 grade	0,0157	radian.
1 *grain* (Troy) (Angleterre)	64,799	milligrammes.
1 —	63,579	dynes.
1 gramme	981	—
1 grammètre	98 100	ergs.
1 *guinea* (21 shillings) . .	26,48	francs.
1 **H***eller* (Autriche, Hongrie)	1,05	centime.
1 henry	10^9	unités C. G. S de coefficient d'induction.
1 heure	3 600	secondes.
1 *horse-power*.	1,01385	cheval (vapeur).
1 —	75,9	kgm : s.
1 —	7 460	meg-ergs par seconde.
1 —	746	watts.
1 *horse-power-hour* . . .	273 740	kilogrammètres.
1 — . . .	746	watts-heure.
1 — *per pound*	1,65	kwh par kg.
1 *hundredweight* (cwt) . .	50,8024	kilogrammes.
1 **I***nch*	2,54	cm.

A.	B.	C.
1 **Joule**	10	meg-ergs.
1 —	0,102	kilogrammètre.
1 jour	24	heures.
1 —	1 440	minutes.
1 —	86 400	secondes.
1 **K***app line*	6 000	unités C. G. S. de flux par pouce-carré.
1 —	932	gauss.
1 kilogramme-seconde .	981 000	unités C. G. S. de quantité de mouvement.
1 kilogrammètre . . .	98,1	meg-ergs.
1 kg : cm²	0,981	mégadyne : cm².
1 kilomètre par heure . .	27,8	cm : s.
1 kilomètre par minute .	16,67	m : s.
1 kilowatt-heure. . .	366 848	kgm.
1 kilowatt-heure. . . .	863	calories (kg-d).
1 *knot*	1 852,3	m : h.
1 —	51,476	cm : s.
1 *kopeck* (Russie) . . .	4	centimes.
1 *kreutzer* (Autriche) . .	2,47	centimes.
1 *kroner* (Scandinavie) .	1,3888	franc.
1 **L***epta* (Grèce). . . .	1	centime.
1 *lew* (Bulgarie)	1	franc.
1 *ley* (Roumanie) . . .	1	franc
1 *line* (Angleterre) . . .	2,1166	mm.
1 *lire* (Italie)	1	franc.
1 *livre* (£) (Angleterre) .	25,22	francs.
1 lux.	1	bougie-décimale à 1 mètre.
1 **M***ark* (Allemagne) . .	1,2345	franc.
1 *markkaa* (Finlande). .	1	franc.
1 maxwell . , ...	1	unité C. G. S. de flux magnétique.
1 meg-erg	10,1936	grammètres.
1 mho	10^9	unités C. G. S. de conductibilité.
1 micron	0,001	mm.
1 *mil* (Angleterre) . . .	0,00254	cm.
1 *mile* (statute, 1760 yards)	1 609,3149	mètres.
1 *mile per hour*	44,7	cm : s.
1 *mile per minute* . . .	26,8215	m : s.
1 *mile* (nautical). . . .	1 852,28	mètres.
1 mile marin	1 852,3	—
1 *milreis* (Brésil) . . .	2,8316	francs.
1 — (Portugal) . .	5,6	—
1 **N***autical mile*. . . .	1 852,3	mètres.
1 **Œ**rsted	1	unité C. G. S. de reluctance.

A.	B.	C.
1 ohm	10^9	unités C. G. S. de résistance.
1 — B. A.	104,87	cm de mercure.
1 — international . .	106,3	—
1 — légal	106,0	—
1 — B. A.	0,98655	ohm international.
1 — légal	0,9972	—
1 — centimètre . . .	10^9	unités C.G.S.de résistibilité.
1 ohm *per yard*	1,0936	ohm : m.
1 — *per mile* . . .	0,62138	ohm : km.
1 *ore* (Scandinavie) . .	1,3888	centimes.
1 *ounce* (avoirdupois) . .	28,3494	grammes.
1 — (troy).	31,1035	—
1 **Para** (Serbie). . . .	1	centime.
1 *peck* (2 gallons) (Anglet.)	9,0869	litres.
1 *penny* (Angleterre) . .	10,5	centimes.
1 *penny per mile*. . . .	6,56	centimes par km.
1 *penny per pound* . . .	23	centimes par kg.
1 *pennyweight* (troy) . .	1,5552	gramme.
1 *peseta* (Espagne) . . .	1	franc.
1 *peso* (Chili)	5	—
1 *peso* (Mexique). . . .	5,43	francs.
1 *pfennig* (Allemagne) . .	1,2345	centime.
1 *piastre* (Chine) . . .	5,38	francs.
1 — (Empire Ottoman)	22,78	centimes.
1 *picul* (Chine)	60,478	kg.
1 *pint* (Angleterre) . . .	0,5679	litre.
1 *pint* (Etats-Unis) . . .	0,474	litre.
1 *pole* (5,5 yards) (Anglet.)	5,02911	mètres.
1 poncelet	100	kgm : s.
1 —	0,981	kilowatt.
1 poncelet-heure. . . .	360 000	kgm.
1 —	0,981	kilowatt-heure.
1 *pound* (Angleterre) . .	453,5927	grammes.
1 *pound per foot*	1 488,19	g : m.
1 *pound per horse-power* .	0,4474	kg par cheval.
1 *pound per mile*. . . .	281,85	g : km.
1 *pound per square inch* .	0,0704	kg : cm².
1 *pound per square foot* .	48,8	g par dm².
1 *pound per yard*.	0,4961	kg : m.
1 *pound per square yard* .	542,5	g : m².
1 *pound per mile* . . .	15,53	francs par km.
1 *pound per yard*. . . .	27,34	francs par mètre.
1 *pound per square yard* . .	29,9	francs par m².
1 *pound per cubic yard*. .	32,7	francs par m³.
1 *pound sterling*	25,2213	francs.
1 *poundal*	14,0906	grammes (force).
1 —	13 825,3	dynes.
1 *poude* (Russie)	16,38	kilogrammes.
1 pyr.	1	bougie décimale.

A.	B.	C.
1 **Quadrant**	1	henry.
1 —	90	degrés.
1 —	10^9	centimètres.
1 *quart* (Angleterre). . .	1,136	litres.
1 *quarter* (64 gallons) . .	290,78	—
1 quintal métrique . . .	100	kilogrammes.
1 **Radian**	57° 14′ 44″	degrés.
1 radian par seconde . .	1	unité C. G S de vitesse angulaire.
1 *rod* (perch carré) . . .	25,2194	m^2.
1 *rood* (1210 yards carrés).	1 011,6775	—
1 *rouble* (Russie). . . .	4	francs.
1 *roupie* (Indes anglaises).	2,3757	—
1 **Sack** (3 bushels) (Anglet.)	109,043	litres.
1 *sagène* (Russie). . . .	213,356	cm.
1 *sagène-cube*.	9,713	m^3.
1 *sen* (Japon)	5,1664	centimes.
1 *shilling* (Angleterre) . .	1,261	francs.
1 *shilling per 1000 cubic feet*	4,45	centimes par m^3.
1 *shilling per ton*. . . .	12,3	centimes par 100 kg.
1 *shilling per gallon* . .	27,5	centimes par litre.
1 *shilling per pound* . .	2,76	francs par kg.
1 *short ton* (2000 livres) (Angleterre)	907,185	kilogrammes.
1 *square-inch*	6,4514	cm^2.
1 *square-foot*	928,9968	—
1 *square-yard*.	0,8361	m^2.
1 *square-mile*.	2,5899	km^2.
1 *statute mile* (1760 yards).	1 609,31	mètres.
1 *stone* (14 pounds) . . .	6,3503	kg.
1 *stotinki* (Bulgarie). . .	1	centime.
1 ***Thermal unit***	0,252	calorie (kg-d).
1 —	108	kgm.
1 —	772	*foot-pounds*.
1 —	1 048	joules.
1 *thoman* (Perse). . . .	8,83	francs.
1 *ton* (avoirdupois) . . .	1 016,05	kilogrammes.
1 *ton per square inch* . .	157,5	kg : cm^2.
1 tonne-mètre.	1 000	kilogrammètres.
1 tour par minute . . .	0,10466	radian par seconde.
1 tour par seconde . . .	6,2832	—
1 ***Unit*** (British Association)	1	ohm B. A.
1 — (Board of Trade-).	1	kilowatt-heure.
1 — (British thermal-).	1 047	joules.
1 unité Siemens	100	cm de mercure.
1 —	0,9407	ohm international.

A.	B.	C.
1 **V***edro* (Russie). . . .	12,2995	litres.
1 *verchoc* (Russie) . . .	4,445	centimètres.
1 *viersta* — . . .	1 066,78	mètres.
1 volt.	10^8	unités C. G. S. de force électromotrice.
1 volt-ampère.	1	watt.
1 **W**att	10^7	unités C. G. S. de puissance.
1 watt-seconde	1	joule.
1 watt-heure	3 600	—
1 watt-heure	0,86	calorie (kg-d).
1 weber	1	unité C. G. S. de flux de force magnétique.
1 *werst* (500 sagènes) (Russie).	1 067	mètres.
1 **Y***ard* (Angleterre). . .	91,4384	cm.
1 *yen* (Japon)	5,1664	francs.

Instruction pour la Règle à Calcul.

Division de la règle et lecture des nombres. — La règle à calcul, modèle Mannheim, se compose d'une règle dans la coulisse de laquelle glisse une réglette.

Les divisions de la partie supérieure de la règle (c'est à dire les divisions placées au dessus de la réglette) constituent deux échelles identiques et consécutives.

La portion depuis 1 gauche jusqu'à 1 milieu constitue la première échelle [1]. Cette portion étant prise pour unité de longueur, on a porté les longueurs 1 — 2, 1 — 3, 1 — 4, etc., proportionnelles aux logarithmes de 2, 3, 4, etc., jusqu'à 10, qui a pour logarithme l'unité.

Les longueurs 1 — 2, 2 — 3, etc., sont elles-mêmes divisées par le même procédé, et donnent, par exemple, entre 2 et 3, les logarithmes des nombres tels que 2,1, 2,2, 2,3, etc. On peut continuer de la même manière; mais on est bientôt arrêté, parce que les traits ainsi obtenus finissent par trop se rapprocher.

On doit imaginer par la pensée l'intervalle compris entre deux traits consécutifs divisé de la même manière que précédemment. On remarquera qu'entre 1,1 et 1,2 1,2 et 1,3... 1,9 et 2 on n'a mis que 5 divisions; chacune d'elles vaut donc deux dixièmes. Dans les calculs avec la règle, on pourra ne jamais s'inquiéter de l'ordre décimal à cause de la propriété des caractéristiques; cette propriété permet au trait gauche de représenter 1, 10, 100, 1000, 0,1, 0,01, etc., puisqu'on peut supposer à gauche ou à droite de la règle autant d'unités qu'on voudra.

---

(1) Cette expression. 1re échelle, sera employée exclusivement pour cette échelle avec la distinction 1re échelle de la règle, 1re échelle de la réglette.

D'après cela un nombre quelconque peut être lu sur la première échelle. La partie inférieure de la règle contient une seule échelle, double de la première. La réglette contient sur sa face les mêmes échelles que la règle, placées de la même manière.

Multiplication. — On emploie les deux échelles inférieures de la règle et de la réglette.

Amener l'un des traits 1 de la réglette sur l'un des facteurs lu sur la règle ; lire le produit sur la règle en face de l'autre facteur lu sur la réglette. Si, en employant le trait 1 gauche, le produit ne peut pas être lu sur la règle, employer le trait 1 droite.

Si l'on a employé le trait 1 droite de la réglette, le produit a autant de chiffres qu'il y en a dans les deux facteurs ; si l'on a employé le trait 1 gauche, il a un chiffre de moins.

Division. — Le procédé est inverse de celui de la multiplication ; on emploie les mêmes échelles.

Placer le diviseur lu sur la réglette au dessus du dividende lu sur la règle ; lire le quotient sur la règle au dessous de l'un des traits 1 de la réglette.

Si l'on a employé le trait 1 droite de la réglette, le nombre de chiffres du quotient est égal à la différence entre le nombre de chiffres du dividende et celui du diviseur ; si l'on a employé le trait 1 gauche, il y a un chiffre de plus au quotient.

Proportion. — On emploie les deux échelles supérieures de la règle et de la réglette.

Effectuer d'abord l'opération nécessaire pour trouver le quotient, et, sans en faire la lecture, chercher le produit de ce quotient par le 3me facteur de la proportion.

Formation des carrés et extraction des racines carrées. — Les nombres de l'échelle supérieure de la règle sont les carrés des nombres de l'échelle inférieure.

Pour obtenir un carré ou une racine carrée, il suffit de mettre ces nombres en regard, soit au moyen du curseur, soit au moyen de l'un des traits 1 de la réglette. On devra observer que la valeur du trait 1 gauche de l'échelle supérieure est toujours le carré de celle du 1 gauche de l'échelle inférieure, et, par suite, elle ne peut être que 1, 100, 10 000 ou 0,01, 0,0001, etc.

On peut du reste toujours ramener l'élévation au carré d'un nombre au cas où il est compris entre 1 et 10, et l'extraction de la racine carrée au cas où il est compris entre 1 et 100.

Formation des cubes. — Pour faire le cube d'un nombre, on renverse la réglette ; on emploie l'échelle inférieure de la règle et ce qui a été appelé première échelle de la réglette.

Mettre en coïncidence les traits indiquant sur chacune de ces échelles le nombre dont on veut avoir le cube ; lire ce dernier sur l'échelle supérieure de la règle en regard du trait 1 de la réglette qui est à la droite du lecteur. La valeur du 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle est alors le cube de celle du 1 gauche de l'échelle inférieure, c'est à dire qu'elle ne peut être que 0,001, 1, 1 000, etc. ; le trait 1 milieu et le trait 1 droite ont des valeurs respectivement 10 et 100 fois plus grandes.

Pour lire tous les cubes par ce procédé, il faudrait trois échelles à la partie supérieure de la règle. Les nombres qui devraient se lire sur la 3me échelle, se liront sur la 1re (qui la remplace) en regard du trait 1 de la réglette, qui est à la gauche du lecteur; alors il faut attribuer au trait 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle les valeurs 0,1, 100, etc., du trait 1 droite, qui n'est autre chose que le trait 1 gauche de la 3me échelle.

La formation des cubes peut aussi s'effectuer sans renverser la réglette.

Extraction des racines cubiques. — Pour l'extraction de la racine cubique, le procédé est inverse; la réglette est renversée.

Lire le nombre dont on veut avoir la racine cubique sur l'échelle supérieure de la règle, en attribuant au 1 gauche de cette échelle les valeurs 0,001, 1, 1 000, etc., cubes de 0,1, 1, 10, etc. Mettre en regard de ce nombre le trait 1 de la réglette qui est à la droite du lecteur.

Si le nombre devait être lu sur la 3me échelle dont nous avons parlé plus haut, mettre le trait 1 de la réglette qui est à la gauche du lecteur en regard de ce nombre lu sur la 1re échelle. Chercher par tâtonnement le nombre dont les traits réels ou fictifs sur l'échelle inférieure de la règle et sur la 1re échelle de la réglette (qui se trouve ici à la droite du lecteur) sont en regard. Ce nombre est la racine cubique cherchée.

On peut du reste toujours ramener l'élévation au cube d'un nombre au cas où il est compris entre 1 et 10, et l'extraction de sa racine cubique au cas où il est compris entre 1 et 1 000.

Sinus, Tangentes. — L'échelle S du revers de la réglette est l'échelle des sinus. Les longueurs, comptées à partir de l'extrémité gauche de cette échelle jusqu'à 1, 2, 3, etc., représentent les logarithmes des sinus naturels des angles de 1°, 2°, 3°, etc., mesurés dans une circonférence de rayon 100. Le dernier trait à droite correspond à sin 90°. Le premier trait à droite de l'extrémité gauche de l'échelle correspond à sin 40'.

L'échelle T, échelle des tangentes, est construite de la même manière. On met l'échelle dont on veut se servir en contact avec l'échelle supérieur de la règle.

Si l'on fait coïncider les extrémités des échelles S ou T avec les extrémités de l'échelle supérieure, on lira en face des traits 1, 2, 3, etc., les sinus ou les tangentes de ces angles.

En attribuant au trait 1 gauche de l'échelle supérieure de la règle la valeur 0,01, et, par suite, au trait 1 droite la valeur 1, on aura les valeurs de ces lignes trigonométriques dans une circonférence de rayon 1.

On obtiendra la valeur des tangentes des angles plus grands que 45° en divisant 1 par la tangente de l'angle complémentaire.

Ces échelles sont employées dans les calculs où il entre des lignes trigonométriques, de la même manière que les échelles ordinaires des nombres.

Logarithmes. — Le revers de la réglette contient aussi une échelle divisée en parties égales; elle sert à mesurer les longueurs représentant, sur l'échelle inférieure de la règle, les parties décimales des logarithmes des nombres. La réglette étant dans sa position ordinaire, amener le trait 1 gauche de la réglette sur le nombre dont on veut avoir le logarithme; lire ce dernier sur l'échelle des parties égales en regard du trait tracé sur le biseau de l'extrémité droite de la règle. Par exemple, pour 2 on trouve 301 qu'il faut lire 0,301.

Divisions en millimètres. — L'échelle du biseau sera employée comme double décimètre. L'échelle placée sur la face opposée à celle du biseau est divisée en millimètres; elle commence à l'extrémité de la règle; cela est indispensable pour mesurer certaines dimensions.

On mesure les longueurs qui dépassent $0^{m}26$ en allongeant la règle au moyen de la réglette, qu'on sort plus ou moins de sa coulisse. La longueur est lue à l'extrémité gauche de la réglette, dans le fond de la coulisse.

Table analytique des Matières.

Pages

INTRODUCTION.

Chapitre I.

EXÉCUTION, DISCUSSION ET COMPTE-RENDU DES ESSAIS.
UNITÉS DE MESURE.

Chapitre II.

MESURES GÉOMÉTRIQUES ET MESURES MÉCANIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Chapitre III.

MESURES PHOTOMÉTRIQUES UTILES A L'ÉLECTRICIEN.

Pages

MESURES ÉLECTRIQUES.

Chapitre IV.

ÉTALONS DE MESURE.

Chapitre V.

MATÉRIEL D'UN LABORATOIRE ÉLECTRIQUE.

Chapitre VI.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE.

Chapitre VII.

MESURE DES COURANTS PAR LES GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE.

Chapitre VIII.

GALVANOMÈTRES ET AMPÈREMÈTRES DIVERS.

Chapitre IX.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES ACTIONS ÉLECTRODYNAMIQUES.

Chapitre X.

MESURE DES COURANTS BASÉE SUR LES EFFETS CALORIFIQUES.

Chapitre XI.

MESURE DES POTENTIELS BASÉE SUR LES MÉTHODES ÉLECTROSTATIQUES.

Pages

Chapitre XII.

MESURE DES POTENTIELS PAR LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Chapitre XIII.

MESURE DES RÉSISTANCES.

Pages

Chapitre XIV.

MESURE DES CAPACITÉS.

Chapitre XV.

MESURE DES PUISSANCES ÉLECTRIQUES.

Chapitre XVI.

MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

Chapitre XVII.

MESURE DES DIFFÉRENCES DE PHASE.

Chapitre XVIII.

MESURE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION.

MESURES MAGNÉTIQUES.

Chapitre XIX.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES.

Chapitre XX.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE ET DE L'HYSTÉRÉSIS.

APPLICATIONS.

Chapitre XXI.

RÉSISTANCE DES GALVANOMÈTRES.

Chapitre XXII.

RÉSISTANCE DES ÉLECTROLYTES.

MÉTHODES DIRECTES.

Chapitre XXIII.

RÉSISTANCE DES TERRES.

Chapitre XXIV.

DÉTERMINATION DES RÉSISTIBILITÉS.

Chapitre XXV.

ESSAIS GÉNÉRAUX DES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

Chapitre XXVI.

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

Chapitre XXVII.

ESSAIS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

Chapitre XXVIII.

ESSAIS SPÉCIAUX AUX RÉSEAUX DE TRACTION ÉLECTRIQUE.

Chapitre XXIX.

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

Chapitre XXX.

ACCUMULATEURS.

Chapitre XXXI.

GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Pages

Chapitre XXXII.

GÉNÉRATEURS ET MOTEURS A COURANT CONTINU.

Chapitre XXXIII.

ALTERNATEURS ET ALTERNOMOTEURS.

Pages

Chapitre XXXIV.

TRANSFORMATEURS.

RENSEIGNEMENTS PRATIQUES.

Table alphabétique des Matières.

Nos DES PAGES.

R

S

T